



**TUGAS AKHIR - TE 141599**

***BEAMFORMING RADAR PHASED MIMO  
DENGAN UKURAN SUBARRAY TRANSMIT BERVARIASI***

Kafabi  
NRP 2212 100 130

Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



***FINAL PROJECT - TE 141599***

***BEAMFORMING PHASED MIMO RADAR  
WITH UNEQUAL TRANSMIT SUBARRAYS***

Kafabi  
NRP 2212 100 130

Supervisors  
Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2016

# LEMBAR PENGESAHAN

**BEAMFORMING RADAR PHASED MIMO  
DENGAN UKURAN SUBARRAY TRANSMIT BERVARIASI**

## TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan Untuk  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro**

**Pada**

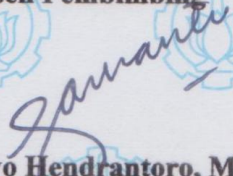
**Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia**

**Jurusan Teknik Elektro**

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui,**

**Dosen Pembimbing**

  
**Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.**  
**NIP. 1970 11 11 1993 03 1002**



## ***Beamforming Radar Phased MIMO dengan Ukuran Subarray Transmit Bervariasi***

Nama : Kafabi

Pembimbing : Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.

### **ABSTRAK**

Radar *phased array* telah banyak digunakan untuk mengarahkan *beam* pada arah yang diinginkan berdasarkan pergeseran fase pada elemen antenna. Gain pada sisi *transmit* sangat menguntungkan dalam mendeteksi target di ruang bebas. Tipe radar lain yang sangat berbeda adalah radar MIMO dengan antenna *collocated* menyediakan resolusi sudut dan pengidentifikasian parameter yang lebih baik.

Gabungan dari radar MIMO dan *phased array* dikembangkan untuk memperoleh keunggulan dari kedua sistem radar tersebut. Gabungan radar MIMO dan *phased array* didapatkan dengan mengatur input *antenna array* menjadi beberapa ukuran *subarray* yang boleh saling tumpang tindih yang dinamakan *phased MIMO radar*. *Phased MIMO radar* dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi didapatkan dengan membagi *array antenna* menjadi *subarray* dengan ukuran yang berbeda dan saling tumpang tindih. Ukuran *subarray transmit* bervariasi yakni *subarray* yang jumlah elemen dari *subarray* baru masing-masing selalu lebih besar dari *subarray* sebelumnya dan setiap *subarray* memancarkan bentuk gelombang yang unik.

Dengan menggunakan cara ini, dapat diperoleh ukuran *subarray* yang berbeda-beda yang dapat memfokuskan beberapa *beam* yang mempunyai *gain* bervariasi pada target yang diinginkan. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh bahwa nilai SINR selalu lebih bagus dari radar *phased MIMO* dengan ukuran *subarray transmit* serbasama. Pada *overall beampattern* memiliki lebar HPBW yang juga selalu lebih sempit dari radar *phased MIMO* dengan ukuran *subarray transmit* serbasama. Nilai *sidelobe* pada *overall beampattern* dengan MVDR *beamformer* paling rendah dibandingkan dengan *phased array*, MIMO dan *phased MIMO* dengan ukuran *subarray transmit* serbasama.

**Kata Kunci :** Radar *Phased -MIMO*, *subarray*, HPBW, *sidelobe*, SINR

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

# ***Beamforming Phased MIMO Radar With Unequal Transmit Subarrays***

Name : Kafabi

Advisors : Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.

## **ABSTRACT**

*Phased array radar has been widely used to steer the beam in the desired direction by shifting the phase at antenna element. Gain on the transmit side is very beneficial in detecting the target in free space. Another type of very different radar is radar MIMO with collocated antenna provide better angular resolution and identification of parameters.*

*A combination of MIMO and phased array radar developed to obtain the advantages of both the radar system. Combined MIMO radar and phased array radar is obtained by adjusting the input array into several sizes subarray may be overlapping called phased MIMO radar. Phased MIMO radar with varies subarray size obtained with divides transmit antenna array into subarray with different size and overlap. Varies transmit subarray size, the subarray that the number of elements of each new subarray is always greater than the previous subarray and each subarray radiates a unique waveform.*

*By using this method, can be obtained subarray sizes varying to focus multiple beams that have varying gain to the intended target. Based on simulation results showed that the value of SINR is always better than radar phased MIMO with equal transmit subarray size. In overall beampattern, HPBW has also always narrower than radar phased MIMO with equal transmit subarray. Sidelobes on the overall beampattern with MVDR beamformer is the lowest compared with the phased array, MIMO and phased MIMO with equal transmit subarray.*

***Keywords :*** Radar phased -MIMO, HPBW, sidelobe, SINR

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK .....	v
<i>ABSTRACT</i> .....	vii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Permasalahan .....	1
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan .....	2
1.5 Metodologi Penelitian .....	2
1.6 Sistematika Pembahasan .....	3
1.7 Relevansi .....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Terminologi Antena .....	5
2.1.1 Geometri Antena .....	6
2.1.2 Pola Radiasi .....	8
2.1.3 Antena <i>Array</i> .....	13
2.1.4 Perkalian Pola .....	17
2.2 Radar .....	18
2.2.1 Radar MIMO .....	20
2.2.1.1 Teknik MIMO .....	20
2.2.1.2 Aplikasi Teknik MIMO dalam Sistem Radar .....	21
2.2.2 Radar <i>Phased Array</i> .....	22
2.2.3 Radar <i>Phased MIMO</i> [8] .....	22
2.3 <i>Beamforming</i> .....	24
2.3.1 <i>Conventional Beamformer</i> .....	25
2.3.2 Algoritma MVDR ( <i>Minimum Variance Distortionless Respon</i> ) .....	25
2.4 SINR .....	26
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....	27
3.1 Pemodelan Sistem .....	27



3.1.1	Parameter Sistem Radar .....	27
3.1.2	Pengaturan Jumlah <i>Subarray Transmit</i> .....	28
3.1.3	Sinyal <i>Transmit</i> .....	30
3.1.4	Sinyal Pantul Dari Target .....	31
3.1.5	Sinyal Pada <i>Receiver</i> .....	31
3.2	Skenario Pengujian Sistem Radar .....	31
3.2.1	Menampilkan Pengujian <i>Beampattern</i> .....	31
3.2.2	Perhitungan HPBW .....	32
3.2.3	Perhitungan Level <i>Sidelobe</i> .....	32
3.2.4	Perhitungan SINR .....	33
BAB 4	ANALISIS HASIL SIMULASI .....	35
4.1	<i>Beampattern</i> .....	35
4.1.1	<i>Transmit Beampattern</i> .....	35
4.1.2	<i>Diversity Beampattern</i> .....	36
4.1.3	<i>Overall Beampattern (Conventional)</i> .....	37
4.1.4	<i>Overall Beampattern (MVDR)</i> .....	38
4.2	<i>Half Power Beamwidth (HPBW)</i> .....	40
4.2.1	<i>HPBW Transmit Beampattern</i> .....	40
4.2.2	<i>HPBW Diversity Beampattern</i> .....	41
4.2.3	<i>HPBW Overall Beampattern</i> .....	42
4.3	<i>Level Sidelobe</i> .....	44
4.3.1	<i>Level Sidelobe Transmit bem</i> .....	44
4.3.2	<i>Level Sidelobe Diversity Beampattern</i> .....	45
4.3.3	<i>Level Sidelobe Overall Beampattern</i> .....	46
4.4	Hasil perhitungan SINR .....	48
4.4.1	Daya Interferensi Lebih Tinggi Dari Daya Noise .....	48
4.4.2	Daya Interferensi Lebih Rendah Dari Daya Noise .....	50
4.5	Sintesis .....	51
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN .....	53
5.1	Kesimpulan .....	53
5.2	Saran .....	53
	DAFTAR PUSTAKA .....	55
	LAMPIRAN A PROPOSAL TUGAS AKHIR .....	57
	LAMPIRAN B LISTING PROGRAM .....	59
	RIWAYAT PENULIS .....	71

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi sistem radar .....	27
Tabel 4.1 HPBW <i>transmit beampattern</i> .....	40
Tabel 4.2 HPBW <i>diversity beampattern</i> .....	41
Tabel 4.3 HPBW <i>overall beampattern (conventional)</i> .....	42
Tabel 4.4 HPBW <i>overall beampattern (MVDR)</i> .....	43
Tabel 4.5 Level <i>sidelobe transmit beampattern</i> .....	44
Tabel 4.6 Level <i>sidelobe diversity beampattern</i> .....	45
Tabel 4.7 Level <i>sidelobe pada overall beampattern (conventional)</i> .....	46
Tabel 4.8 Level <i>sidelobe pada overall beampattern (MVDR)</i> .....	47

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Koordinat analisis sistem antenna[11].....	7
Gambar 2.2 Pola Radiasi <i>Endfire</i> [12].....	8
Gambar 2.3 Pola Radiasi <i>Broadside</i> [12].....	9
Gambar 2.4 Pola Radiasi <i>Intermediate</i> [12].....	9
Gambar 2.5 Pola radasi : (a) plot linier, (b) Plot polar[11] .....	11
Gambar 2.6 Polar plot pola radiasi suatu antenna[12].....	12
Gambar 2.7 Ilustrasi Antena <i>array</i> linier[12].....	15
Gambar 2.8 Perkalian pola[12].....	18
Gambar 2.9 Sitem Radar [1].....	19
Gambar 2.10 Diagram Blok Radar [1].....	19
Gambar 2.11 Kanal MIMO[13].....	21
Gambar 2.12 <i>Beam steering</i> pada radar <i>phased array</i> (a) menggunakan <i>time delay</i> (b) menggunakan <i>phase shifter</i> [3] .....	22
Gambar 3.1 Skema transmit radar <i>phased array</i> .....	28
Gambar 3.2 Skema <i>transmit</i> radar MIMO .....	29
Gambar 3.3 Skema <i>transmit</i> radar <i>phased</i> MIMO .....	29
Gambar 3.4 Skema transmit radar <i>phased</i> MIMO dengan ukuran <i>subarray</i> transmit bervariasi.....	29
Gambar 3.5. Sinyal radar <i>Phased array</i> .....	30
Gambar 3.6. Sinyal radar MIMO.....	30
Gambar 3.7. Sinyal radar <i>phased</i> -MIMO (N=5) .....	31
Gambar 4.1 <i>Transmit Beampattern</i> .....	35
Gambar 4.2 <i>Diversity Beampattern</i> .....	36
Gambar 4.3 Overall <i>Beampattern (conventional)</i> SNR=0dB .....	37
Gambar 4.4 Overall <i>beampattern</i> menggunakan MVDR pada daya interferensi -30 dB .....	38
Gambar 4.5 Overall <i>beampattern</i> (MVDR) pada daya interferensi 30 dB .....	39
Gambar 4.6 <i>HPBW transmit beampattern</i> .....	40
Gambar 4.7 <i>HPBW diversity beampattern</i> .....	41
Gambar 4.8 <i>HPBW overall beampattern conventional</i> .....	42
Gambar 4.9 <i>HPBW Overall beampattern (conventional)</i> .....	43
Gambar 4.10 Level <i>sidelobe transmit beampattern</i> .....	44
Gambar 4.11 Level <i>sidelobe diversity beampattern</i> .....	45
Gambar 4.12 Level <i>sidelobe</i> pada <i>overall beampattern (conventional)</i> .....	46
Gambar 4.13 <i>Overall beampattern</i> (MVDR).....	47
Gambar 4.14 <i>SINR conventional</i> .....	48

Gambar 4.15 SINR MVDR .....49

Gambar 4.16 SINR *conventional* .....50

Gambar 4.17 SINR MVDR.....51

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa dekade terakhir, banyak penelitian yang dikembangkan dalam bidang radar. Radar (*Radio Detection and Ranging*) merupakan sistem elektromagnetik untuk mendeteksi posisi dan kecepatan dari suatu objek, bekerja dengan memancarkan sinyal elektromagnetik dan menerima sinyal *echoes* dari objek (target). Radar banyak dikembangkan terutama untuk peningkatan akurasi posisi dan kecepatan objek (target) yang diamati. Pengembangan, pada umumnya dilakukan dengan mengganti *waveform* atau bentuk sinyal dan jumlah antenna yang digunakan.

Radar *phased array* telah banyak digunakan untuk mengarahkan *beam* pada arah yang diinginkan berdasarkan pergeseran fase pada elemen antenna. *Gain* pada sisi *transmit* sangat menguntungkan dalam mendeteksi target di ruang bebas. Di sisi lain, terdapat tipe radar yang sangat berbeda dari radar *phased array* yakni radar MIMO dengan antenna *collocated* yang telah menyita perhatian para peneliti selama satu dekade terakhir. Radar MIMO dengan antenna *collocated* menyediakan resolusi sudut dan pengidentifikasian parameter yang lebih baik. Gabungan dari radar MIMO dan *phased array* dikembangkan pada beberapa tahun terakhir untuk mengombinasikan keuntungan dari radar MIMO dan *phased array*. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini akan dirancang simulasi radar *phased* -MIMO dengan ukuran *subarray transmit* yang bervariasi guna mengetahui performansi sistem radar tersebut.

### 1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana kinerja radar *Phased* -MIMO dengan ukuran *subarray transmit* yang bervariasi dibandingkan dengan radar *Phased array*, MIMO dan *Phased* MIMO dengan ukuran *subarray* serbasama dilihat dari *mainbeam*, level *sidelobe*, dan SINR?

### 1.3 Batasan Masalah

Pada tugas akhir ini penulis akan melakukan simulasi penggunaan ukuran *subarray transmit* bervariasi pada radar *Phased MIMO*. Adapun batasan permasalahan tugas akhir ini adalah:

1. Program simulasi yang digunakan adalah MatLab.
2. Radar yang digunakan berbentuk radar pulsa
3. Pengukuran parameter yang dideteksi adalah *mainbeam*, level *sidelobe*, dan SINR.

### 1.4 Tujuan

Tugas Akhir ini diharapkan dapat menghasilkan suatu simulasi penggunaan metode ukuran *subarray transmit* bervariasi pada radar *phased* -MIMO, serta menganalisis performansi dari konsep metode ukuran *subarray transmit* bervariasi pada radar *phased* MIMO dari hasil simulasi menggunakan software MatLab dibandingkan dengan radar *phased array*, MIMO dan *phased* MIMO dengan ukuran *subarray* serbasama.

### 1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi yang akan diterapkan dalam tugas akhir ini terdiri dari tahapan-tahapan sebagai berikut:

#### 1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mempelajari paper dan buku yang sesuai dengan topik tugas akhir, materi yang dipelajari yaitu:

- a. Sistem radar, mempelajari tentang persamaan radar dan parameter-parameter yang harus dipenuhi
- b. MIMO, mempelajari teknik pengiriman sinyal transmisi dan pengolahan sinyal pantulan yang masuk ke sisi penerima
- c. *Phased array* radar, mempelajari pengolahan *gain* pada beam yang dihasilkan.

#### 2. Pengujian Sistem

Pada tugas akhir ini akan dilakukan pengujian sistem radar *Phased* MIMO dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi menggunakan software MatLab. Skenario simulasi pada pengujian sistem ini adalah untuk pengaturan *subarray*. Untuk parameter yang akan diidentifikasi pada pengujian sistem meliputi:

- a. *Mainbeam*,
- b. Level *sidelobe*.

c. Nilai SINR

3. Analisis Data dan Penarikan Kesimpulan

Data dari pengujian sistem akan diolah dan dianalisis. Setelah itu dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan hasil analisis data.

## 1.6 Sistematika Pembahasan

Pembahasan tugas akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan sistematika pembahasan sebagai berikut:

### BAB I Pendahuluan

Bab ini meliputi latar belakang, permasalahan, tujuan penelitian, metodologi penelitian, sistematika laporan, serta relevansinya.

### BAB II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi tentang tinjauan pustaka mengenai sistem radar, sistem MIMO, antena *array* linier, sinyal orthogonal, dan beamforming.

### BAB III Metodologi Penelitian

Bab ini membahas skenario simulasi kinerja radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi yang dibandingkan dengan radar *phased array*, MIMO dan *Phased* MIMO dengan ukuran *subarray* serbasama.

### BAB IV Pengujian dan Analisis

Bab ini berisi hasil berupa grafik dan data disertai analisis dari simulasi kinerja yang telah dilakukan.

### BAB V Penutup

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil analisis pada bab 4.

## 1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat antara lain:

1. Sistem ini dapat dijadikan acuan dalam pengimplementasian sistem radar *Phased* -MIMO untuk mendapatkan kualitas *beamforming* yang baik.
2. Memberikan kontribusi berupa sistem radar baru yang memiliki *gain* tinggi serta tahan terhadap interferensi.



*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Terminologi Antena

Antena di definisikan sebagai suatu perangkat yang digunakan untuk meradiasikan atau menerima gelombang radio. Pada sistem komunikasi nirkabel (*wireless*), antena digunakan untuk proses transmisi dan deteksi. Antena didefinisikan juga sebagai peralatan-peralatan untuk proses *coupling* frekuensi radio dari transmisi kabel menuju ruang bebas, meradiasikan daya ke ruang bebas, dan sebaliknya. Antena memiliki desain yang beragam mulai dari yang sederhana seperti sepotong kabel, sampai dengan desain yang rumit dengan komponen elektronik aktif. Karena merupakan perangkat perantara antara saluran transmisi dan udara, maka antena harus memiliki sifat yang sesuai (*match*) dengan saluran pencatunya.

Dari definisi diatas antena dapat diterapkan dalam beberapa fungsi sebagai berikut :

- Antena pemancar *broadcast* untuk memancarkan sinyal dari satu titik menuju area yang sangat luas, misalnya antena pemancar radio FM, antena pemancar Televisi, antena GPS (*Global Positioning System*) dan sebagainya.
- Antena komunikasi *point to point* untuk mentransfer sinyal dari suatu tempat ke tempat yang lain, misalnya antena sistem transmisi *terrestrial*, antena sistem satelit, dan sebagainya.
- Antena penerima yang difungsikan untuk menerima sinyal, baik dari pemancar buatan manusia (dalam kasus *broadcast* ataupun *point to point*) atau menerima sinyal bebas dari langit (dalam kasus radiometer, pengukuran *noise temperature* atmosfer, atau radio *sonde* untuk mencari bintang di langit).

Secara umum, antena dibedakan menjadi antena *isotropis*, antena *omnidirectional*, antena *directional*, antena *Phased array*, antena optimal, dan antena adaptif. Antena *isotropis* merupakan titik yang memancarkan daya ke segala arah dengan intensitas yang sama, seperti permukaan bola. Antena ini tidak ada dalam dunia nyata dan hanya dipergunakan sebagai dasar untuk merancang dan menganalisis antena yang lebih kompleks. Antena *omnidirectional* adalah antena yang memancarkan daya ke segala arah, dan bentuk pola radiasinya digambarkan sebagai bentuk donat (*doughnut*) dengan pusat berimpit.

Antena ini ada dalam kenyataan dan dalam pengukuran sering digunakan sebagai pembanding terhadap antena yang lebih kompleks. Contoh antena ini adalah antena *dipole* setengah panjang gelombang. Antena *directional* adalah antena yang memancarkan daya menuju arah tertentu. *Gain* antena dari antena ini relatif lebih besar dibandingkan dengan antena *omnidirectional*. Contoh, suatu antena dengan gain 10 dBi (kadang kadang dinyatakan dengan “dBic” atau disingkat “dB” saja). Artinya antena ini pada arah tertentu memancarkan daya 10 dB lebih besar dibandingkan dengan antena *isotropis*. Ketiga jenis antena diatas merupakan antena tunggal, dan bentuk pola radiasinya tidak dapat berubah tanpa merubah fisik antena atau memutar secara mekanik dari fisik antena.

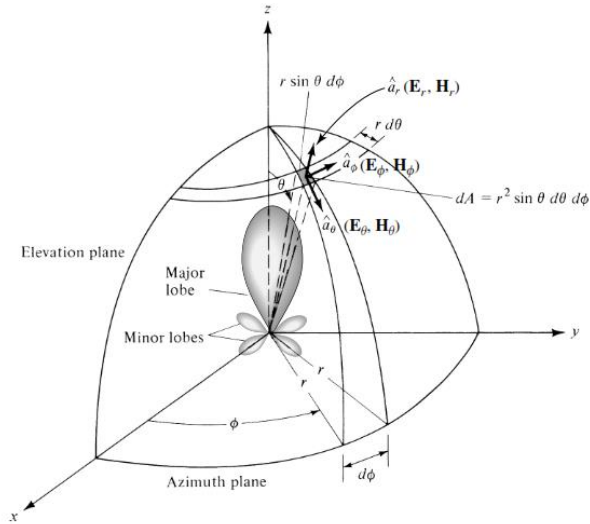
Selanjutnya adalah antena *Phased array*, yang merupakan gabungan atau konfigurasi *array* dari beberapa antena sederhana dan menggabungkan sinyal yang menginduksi masing-masing antena tersebut untuk membentuk pola radiasi tertentu pada keluaran *array*. Setiap antena yang menyusun konfigurasi *array* dinamakan dengan elemen *array*. Arah gain maksimum dari antena *phased array* dapat ditentukan dengan pengaturan fase antar elemen-elemen *array*.

Antena optimal merupakan antena dimana penguatan (*gain*) dan fase relatif setiap elemennya diatur sedemikian rupa untuk menghasilkan kinerja (*performance*) pada keluaran yang seoptimal mungkin. Kinerja yang dimaksud adalah antara lain *Signal to Interference Ratio* (SIR) atau *Signal to Interference plus Noise Ratio* (SINR). Optimasi kinerja dapat dilakukan dengan menghilangkan atau meminimalkan penerimaan sinyal-sinyal yang tidak dikehendaki (interferensi) dan mengoptimalkan penerimaan sinyal yang dikehendaki.

Antena adaptif merupakan pengembangan dari antena *Phased array* maupun antena optimal, dimana arah gain maksimum dapat diatur sesuai dengan gerakan dinamis (*dynamic fashion*) objek yang dituju. Antena dilengkapi dengan *Digital Signal Processor* (DSP), sehingga secara dinamis mampu mendeteksi dan melacak berbagai macam tipe sinyal, meminimalkan interferensi serta memaksimalkan penerimaan sinyal yang diinginkan.

### 2.1.1 Geometri Antena

Input antena berupa sinyal dari transmisi kabel. Diasumsikan sinyal tersebut mempunyai daya rata-rata  $p_t$ . Antena meradiasikan daya ke seluruh arah.



**Gambar 2.1** Koordinat analisis sistem antenna[11]

Untuk memudahkan analisis, definisi arah dinyatakan dalam koordinat polar,  $\phi$  dan  $\theta$ . Jika vektor  $\mathbf{r}$  merupakan sistem koordinat polar, maka  $\phi$  adalah sudut antara axis-x dan proyeksi  $\mathbf{r}$  kepada bidang x-y, dan  $\theta$  adalah sudut antara axis-z dan  $\mathbf{r}$ .

Kerapatan daya, dengan satuan  $\text{W}/(\text{rad})^2$ , untuk arah  $(\phi, \theta)$ , adalah  $U(\phi, \theta)$ . Jika diasumsikan antenna adalah *loseless*, dan tertangkap sempurna, maka seluruh daya dari  $P_t$ , yang dikirimkan ke antenna melalui *waveguide* akan diradiasikan. Pada asumsi ini, daya total yang ditransmisikan ditulis

$$P_t = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} U(\phi, \theta) \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (2.1)$$

Kerapatan daya rata-rata  $U_{\text{ave}}$  adalah

$$U_{\text{ave}} = \frac{P_t}{4\pi} = \frac{1}{4\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} U(\phi, \theta) \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (2.2)$$

Jika antenna mentransmisikan daya yang sama ke segala arah, maka nilai  $U(\phi, \theta)$  akan sebanding dengan  $U_{\text{ave}}$ , dan antenna disebut sebagai

isotropis. Antena *isotropis* sangat berguna untuk analisis performansi, namun pada penggunaannya, antena praktis pasti memiliki daya yang lebih besar pada arah tertentu. Nilai maksimum untuk kerapatan daya antena adalah

$$U_m = \max_{\phi, \theta} U(\phi, \theta) \quad (2.3)$$

### 2.1.2 Pola Radiasi

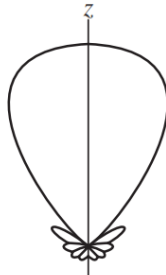
Pola radiasi (*radiation pattern*) merupakan salah satu parameter penting dari suatu antena. Parameter ini sering dijumpai dalam spesifikasi suatu antena, sehingga pembaca dapat membayangkan bentuk pancaran yang dihasilkan oleh antena tersebut.

Pola radiasi suatu antena didefinisikan sebagai pernyataan secara grafis yang menggambarkan sifat radiasi suatu antena (pada kondisi medan jauh) sebagai fungsi arah atau sudut suatu koordinat. Pola radiasi dapat disebut sebagai pola medan (*field pattern*) apabila intensitas radiasi yang digambarkan adalah kuat medannya dan disebut sebagai pola daya (*power pattern*) apabila intensitas radiasi yang digambarkan adalah vector *pointing*-nya.

Pengarahan pola radiasi antena dapat dibedakan menjadi tiga kategori, yaitu :

1. Pola radiasi pada arah *endfire*

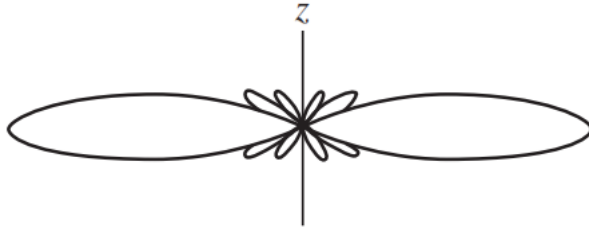
Antena disebut mempunyai pola radiasi pada arah *endfire* jika pola radiasi maksimum pada arah  $0^\circ$  bidang antena.



**Gambar 2.2** Pola Radiasi *Endfire* [12]

2. Pola radiasi pada arah *broadside*

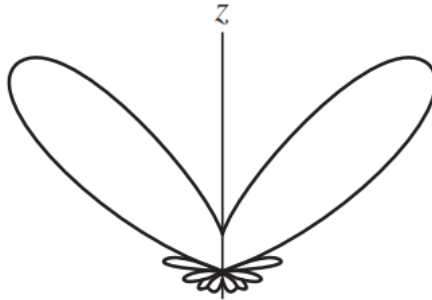
Antena mempunyai pola radiasi pada arah *broadside* apabila pola radiasi maksimum berada pada daerah tegak lurus bidang antena.



**Gambar 2.3** Pola Radiasi *Broadside*[12]

3. Pola radiasi *intermediate*

Antena yang mempunyai pola radiasi di mana arah maksimum *mainlobe* berada diantara bentuk *broadside* dan *endfire* yang disebut dengan *intermediate*. Antena yang mempunyai pola radiasi *intermediate* banyak dijumpai pada *Phased array* antena.



**Gambar 2.4** Pola Radiasi *Intermediate*[12]

Pola radiasi diukur di daerah medan jauh dimana distribusi angular daya yang diradiasikan tidak tergantung jarak.

$$\text{Kondisi medan jauh terpenuhi jika: } r > \frac{2 D^2}{\lambda} \quad (2.4)$$

$$r \gg D \quad (2.5)$$

$$r \gg \lambda \quad (2.6)$$

dimana

$D$  = panjang antenna

$r$  = jarak titik pusat ke suatu titik pengamatan

$\lambda$  = panjang gelombang

Dalam koordinat bola, medan listrik  $E$  dan medan magnet  $H$  telah diketahui, keduanya memiliki komponen vektor  $\theta$  dan  $\phi$  yang masing-masing menyatakan komponen sudut *elevasi* dan sudut *azimuth*. Sedangkan vektor *pointing*-nya dalam koordinat ini hanya mempunyai komponen radial saja dan dinyatakan dengan :

$$Pr = \frac{1}{2} \frac{|E|^2}{\eta} \quad (2.7)$$

Dengan :

$$|E| = \sqrt{E_\theta^2 + E_\phi^2}, \text{ menyatakan resultan magnitudo}$$

$E_\theta$  = komponen medan listrik pada arah  $\theta$ .

$E_\phi$  = komponen medan listrik pada arah  $\phi$ .

$H$  = impedansi intrinsik ruang bebas ( $377 \Omega$ ).

Untuk menyatakan pola radiasi secara grafis, pola radiasi umumnya digambarkan dalam bentuk relatif. Maksudnya bentuk pola yang sudah dinormalisasi, dimana setiap nilai pola radiasi tersebut telah dibandingkan dengan harga maksimumnya. Untuk pola medan, apabila dinyatakan dalam pola yang ternormalisasi dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$F(\theta, \phi) = \frac{E(\theta, \phi)}{E(\theta, \phi)_{max}} \quad (2.8)$$

Karena vektor *pynting* hanya mempunyai komponen radial dan menurut persamaan (2.5) berbanding lurus dengan kuadrat *magnitude* kuat medannya, maka pola daya apabila dinyatakan dalam pola ternormalisasi, sama dengan kuadrat pola medan yang sudah dinormalisasikan.

$$F(\theta, \varphi) = |F(\theta, \varphi)|^2 \quad (2.9)$$

Seringkali juga pola radiasi suatu antenna digambarkan dengan satuan *decibel* (dB). Intensitas medan dalam *decibel* didefinisikan sebagai:

$$F(\theta, \varphi)_{dB} = 20 \log |F(\theta, \varphi)| \text{ (dB)} \quad (2.10)$$

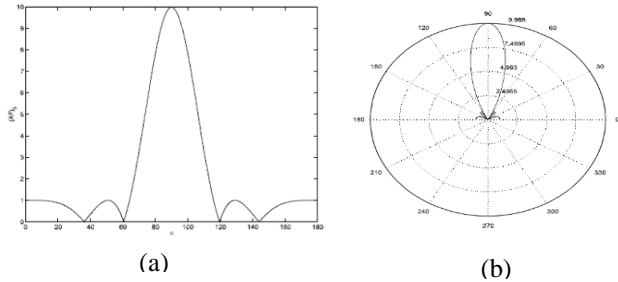
Sedangkan untuk pola dayanya dalam *decibel* dinyatakan dengan :

$$P(\theta, \varphi)_{dB} = 10 \log |P(\theta, \varphi)| \text{ (dB)} \quad (2.11)$$

$$P(\theta, \varphi)_{dB} = 20 \log |F(\theta, \varphi)| \text{ (dB)} \quad (2.12)$$

Dengan demikian, dalam unit *decibel* pola daya sama dengan pola medannya. Pada gambar x.x merupakan contoh faktor *array* dari antenna linier dengan arah pancaran utama (*main beam*)  $\theta = 0^\circ$

Untuk menggambarkan sifat radiasi dari suatu antenna dengan konfigurasi *array*, pola radiasi sering dinyatakan dengan faktor *array* (*array factor*) dimana pola dan sifat radiasi hasil perancangan antenna *array*, dengan elemen-elemen *array* merupakan sumber *isotropis*. sehingga, formulasi faktor *array* ternormalisasi identik.



**Gambar 2.5** Pola radiasi : (a) plot linier, (b) Plot polar[11]

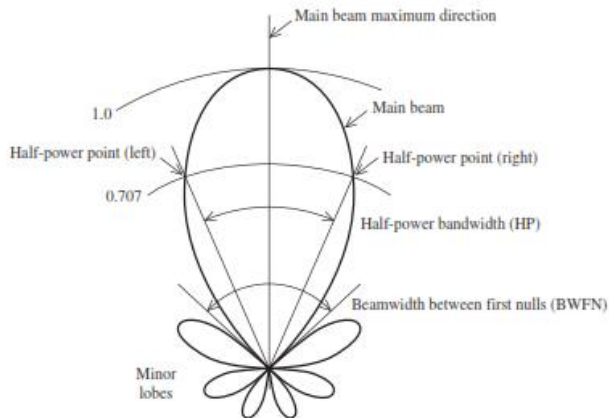


### 2.1.2.1 Jenis Pola Radiasi

Pola *isotropis* adalah pola suatu antenna yang meradiasikan atau menerima energi elektromagnetik sama ke segala arah. Pola *isotropis* adalah konsep ideal yang secara fisik tidak ada, dapat digambarkan sebagai bola. Radiator *isotropis* berada pada pusat bola sedangkan radiasinya menyebar pada seluruh permukaan bola. Antena direksional adalah antenna yang meradiasikan atau menerima energi ke atau dari arah tertentu lebih besar daripada arah lain. Antena omnidireksional adalah antenna yang memiliki pola tidak direksional pada bidang tertentu dan pola direksional pada bidang lain yang *orthogonal* dengan bidang tersebut.

### 2.1.2.2 Parameter Pola Radiasi

Bagian-bagian yang bervariasi dari pola radiasi disebut sebagai *lobe*. *Lobe* dikategorikan menjadi beberapa bagian, yaitu : *major lobe* atau *main lobe* atau *mainbeam*, *minor lobe* atau *side lobe*, dan *back lobe*. *Radiation lobe* adalah bagian dari pola radiasi yang dibatasi yang dibatasi oleh daerah dengan intensitas radiasi yang relatif rendah. Konfigurasi tiga dimensi pola radiasi dalam bentuk polar dapat dilihat pada **gambar 2.6**



**Gambar 2.6** Polar plot pola radiasi suatu antenna[12]

- *Sidelobe Level*

*Major lobe (main beam)* didefinisikan sebagai *lobe* yang memiliki arah dengan radiasi maksimum. Biasanya juga ada beberapa *lobe* yang lebih kecil dibandingkan dengan *main lobe*. *Lobe-lobe* selain *main lobe*

disebut dengan *minor lobe*. *Side lobe* adalah *lobe* pada arah manapun yang berbeda dari arah *lobe* yang ada. *Back lobe* adalah lobe dimana sumbu z memiliki sudut sebesar 180° dan berhubungan dengan beam antenna. *Minor lobe* pada umumnya menunjukkan radiasi dari arah yang tidak diinginkan sehingga *minor lobe* harus diminimumkan. *Sidelobe* umumnya adalah *minor lobe* yang terbesar. *Side lobe* dapat bernilai positif atau negatif.

Ukuran yang menyatakan seberapa besar daya terkonsentrasi pada main lobe disebut dengan *sidelobe level* yang merupakan rasio dari besar puncak side lobe dengan nilai dari main lobe. Level *sidelobe* terbesar untuk seluruh pola adalah maksimum *sidelobe level* disingkat dengan SLL dan dinyatakan dalam *decibel*. Persamaan untuk mencari nilai SLL dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$SLL_{dB} = 20 \text{ Log } \left| \frac{F(SLL)}{F(max)} \right| \quad (2.10)$$

Dimana

$|F(max)|$  adalah nilai maksimum dari main lobe

$|F(SLL)|$  adalah nilai maksimum dari *sidelobe* tertinggi

- **Half-Power Beamwidth**

*Half power beamwidth* (HPBW) adalah sudut antara dua titik pada pola radiasi saat daya radiasi turun 3 dB atau menjadi setengah daya maksimumnya. *Half-power beamwidth* dinyatakan dengan

$$HPBW = |\theta_{HPBWleft} - \theta_{HPBWright}| \quad (2.11)$$

Dimana  $\theta_{HPBWleft}$  dan  $\theta_{HPBWright}$  adalah titik-titik pada kiri dan kanan dari main beam dimana pola daya mempunyai harga setengah. HPBW juga dapat digunakan untuk mengukur level *gain* dimana semakin sempit HPBW maka semakin bagus level *gain* dari sistem radar.

### 2.1.3 Antena Array

Digram radiasi dari sebuah antena secara tersendiri (*single antena*) biasanya relatif lebar, misalnya dipole setengah panjang gelombang (1/2 lambda) memiliki beamwidth 78°, atau dipole dengan panjang lambda 48°. Antena yang memiliki beamwidth lebar akan memiliki direktivitas dan gain yang relatif rendah.

Pada komunikasi jarak jauh seperti radar, dibutuhkan antena yang memiliki gain yang tinggi. Dengan gain yang tinggi ini, bisa didapatkan nilai *Equivalent Isotrop Radiated Power* (EIRP) yang juga tinggi, yang otomatis membuat jangkauan (*range*) yang lebih besar.

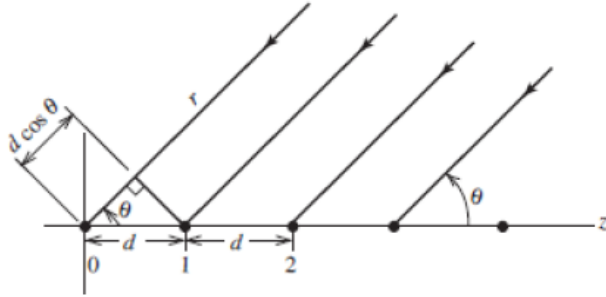
Pada aplikasi radar digunakan antena yang memiliki beamwidth yang sangat sempit, yang akan menentukan resolusi sudut dari radar tersebut, sehingga bisa mendeteksi objek-objek yang berdekatan sebagai objek deteksi yang terpisah.

Untuk menapatkan antena yang seperti ini, kita bisa memperbesar ukuran dari antena itu sampai melebihi panjang gelombangnya. Tetapi alternatif seperti ini akan melahirkan masalah baru, yaitu munculnya *sidelobe* tambahan dengan peredaman yang mengganggu. Makin panjang atau besar antena tersebut, maka makin banyak pula side lobes-nya. Hal ini juga membuat masalah yang berkaitan dengan mekanis dari antena yang terus membesar.

Dalam penelitian ini dipergunakan cara lain, yaitu dengan menggunakan beberapa antena yang disusun menurut konfigurasi geometris dan elektrik tertentu. Susunan antena ini disebut dengan *array* (grup antena). Antena-antena yang disusun menjadi grup atau kelompok ini merupakan antena yang memiliki tipe sejenis (misal *array dipole*, *array waveguide*, *array mikrostrip*). Medan listrik atau medan magnet total dari *array* adalah superposisi secara vektorial medan yang dihasilkan dari masing-masing antena. Dalam menghasilkan suatu diagram radiasi tertentu, ke arah pancar yang diprioritaskan untuk mendapatkan direktivitas yang tinggi, diupayakan medan vektornya saling bersuperposisi secara konstruktif (saling menjumlahkan), sedang ke arah pancar yang lain yang diinginkan memiliki direktivitas rendah superposisinya diupayakan berlangsung secara destruktif (saling mengurangi).

### **2.1.3.1 Array Linier**

Antena *array* linier merupakan susunan beberapa elemen antena sehingga membentuk garis lurus. Jarak antar elemen bisa diatur sama atau tidak, tergantung permasalahan yang hendak diamati.



**Gambar 2.7** Ilustrasi Antena *array* linier[12]

Pada gambar 2.7 menunjukkan bentuk antena *array* linier yang terdiri dari beberapa elemen (dari elemen ke-0 sampai N-1). Jarak antar elemen  $d$  diasumsikan sama panjang. Sudut  $\theta$  merupakan sudut yang dibentuk dari gelombang datang menuju elemen *array* sepanjang sumbu  $z$ . Respon dari sumber *isotropis* sama di segala arah, tetapi ketika keluaran ditambahkan (masing-masing diberi bobot berdasarkan  $I_n$ ), diperoleh respon arah. Fase dari gelombang datang pada *array* dimulai dari 0 jadi  $\zeta_0 = 0$ . Gelombang datang pada elemen 1 datang sebelum fase gelombang datang pada sumbu dengan jarak yang lebih pendek  $d \cos \theta$ . Selisih fase antar elemen yang berdekatan adalah  $\zeta_1 = \beta d \cos \theta$ , dimana  $\zeta_0, \zeta_1, \dots$  adalah fase gelombang datang pada elemen antena yang ditandai dengan 0,1, ...

*Array factor* dari sebuah antena *array* N-elemen bisa didapatkan dengan mempertimbangkan elemen sebagai titik sumber. Jika setiap elemennya bukan merupakan sumber isotropis, maka total medan yang dapat dibentuk adalah hasil perkalian antara *array factor* dari sebuah sumber *isotropis* dengan medan dari elemen tunggal.

Untuk *array* linier N-elemen *array factor* yang dapat dibentuk adalah sebagai berikut :

$$AF = 1 + e^{j(kd \cos \vartheta + \beta)} + e^{j2(kd \cos \vartheta + \beta)} + \dots + e^{j(N-1)(kd \cos \vartheta + \beta)} \quad (2.12)$$

Dimana

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$\vartheta$  = sudut datang sinyal  
 $\beta$  = beda fase  
 $N$  = jumlah elemen antenna

Jika  $\psi = kd \cos \vartheta + \beta$ , rumus *Array* faktor diatas dapat ditulis sebagai :

$$AF = 1 + e^{j\psi} + e^{j2\psi} + e^{j3\psi} + \dots + e^{j(N-1)\psi} \quad (2.13)$$

Jika ruas kiri dan ruas kanan kita kalikan dengan  $e^{j\psi}$ , maka

$$AF \cdot e^{j\psi} = e^{j\psi} + e^{j2\psi} + e^{j3\psi} + e^{j4\psi} + \dots + e^{jN\psi} \quad (2.13)$$

$$AF \cdot e^{j\psi} - AF = e^{jN\psi} - 1 \quad (2.14)$$

$$AF (e^{j\psi} - 1) = e^{jN\psi} - 1 \quad (2.15)$$

$$AF = \frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} = \frac{e^{j\frac{N\psi}{2}} e^{j\frac{N\psi}{2}} - e^{-j\frac{N\psi}{2}}}{e^{j\frac{\psi}{2}} e^{j\frac{\psi}{2}} - e^{-j\frac{\psi}{2}}} \quad (2.16)$$

$$AF = e^{j(N-1)\frac{\psi}{2}} \frac{\sin(\frac{N\psi}{2})}{\sin(\frac{\psi}{2})} \quad (2.17)$$

$$AF = \frac{\sin(\frac{N\psi}{2})}{\sin(\frac{\psi}{2})} \quad (2.18)$$

$$AF_{\max} = A_0 N \quad (2.19)$$

Persamaan diatas merupakan fungsi dari factor *array* ternormalisasi untuk N-elemen dari linier *array* dengan eksitasi amplitud arus yang serbasama, atau lebih dikenal dengan *Uniform Linier Array* (ULA).

Beberapa hal yang dapat diperhatikan pada factor *array* untuk berbagai jumlah elemen pada *array* adalah :

1. Jumlah N bertambah maka *main beam* dan *main lobe* akan menjadi lebi sempit

2. Menambah jumlah  $N$  maka akan menambah jumlah *side lobe* dalam satu periode dari fungsi  $f(\psi)$ . Jumlah keseluruhan *lobe* (satu *main lobe* dan sejumlah *side lobe*) dalam satu periode adalah sejumlah  $N-1$ , sehingga ada  $N-1$  *sidelobe* dan satu *main lobe* dalam setiap periodenya.
3. *Minor Lobe* mempunyai lebar  $2\pi/N$ , sedangkan untuk *lobe* utama dan *grating lobe* mempunyai lebar dua kali lipatnya.

### 2.1.4 Perkalian Pola (Pattern Multiplication)

Dalam perancangan suatu antenna *array*, elemen-elemen penyusunnya diasumsikan sebagai sumber titik (*isotropis*). Dalam kenyataannya, elemen-elemen dari antenna *array* merupakan antenna yang sebenarnya (*real*) misalnya, antenna dipole, antenna *helix*, antenna parabola, dan sebagainya. Untuk mendapatkan pola radiasi total; dari suatu susunan *array* dari antenna yang sebenarnya, maka dilakukan prinsip perkalian pola (*pattern multiplication*).

Seperti dijelaskan pada bagian sebelumnya, hasil perancangan suatu *array* dengan elemen *isotropis*, diperoleh parameter yang disebut dengan faktor *array* (*array factor*). Sedangkan pola yang dihasilkan dari sifat radiasi dari elemen individu yang merupakan antenna sebenarnya, disebut faktor elemen (*element factor*).

Pola radiasi ternormalisasi secara lengkap dari sebuah antenna *array* dinyatakan dengan :

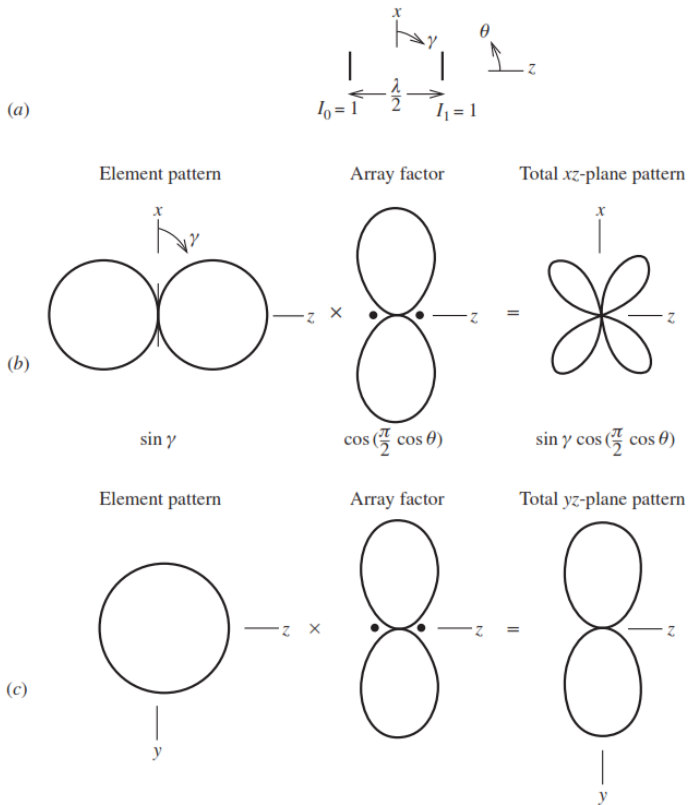
$$F(\theta, \phi) = g_a(\theta, \phi) \times f(\theta, \phi) \quad (2.20)$$

Dimana :

$g_a(\theta, \phi)$  = pola elemen.

$f(\theta, \phi)$  = faktor *array*.

Untuk menggambarkan prinsip perkalian pola tersebut diberikan pengertian sebagai berikut, dua buah dipole pendek sejajar terpisah sejauh  $\lambda/2$  dan dieksitasikan dengan arus yang sama. Pola elemen untuk sebuah elemen sepanjang sumbu *array* dinyatakan sengah  $\sin \theta$ , sedangkan faktor *array* dari hasil perancangan dua sumber isotropis tersebut diperoleh  $\cos[(\pi/2) \cos \theta]$ . Pola total dari susunan antenna *array* yang demikian adalah  $\sin \theta \cos[(\pi/2) \cos \theta]$ .

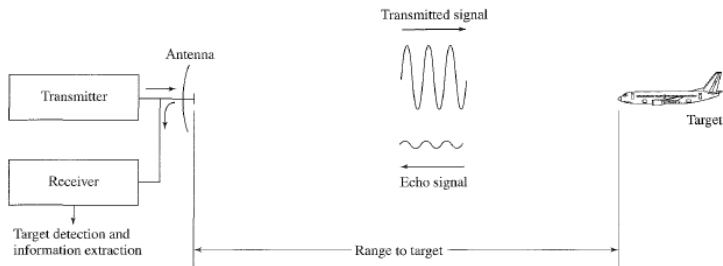


**Gambar 2.8** Perkalian pola[12]

## 2.2 Radar

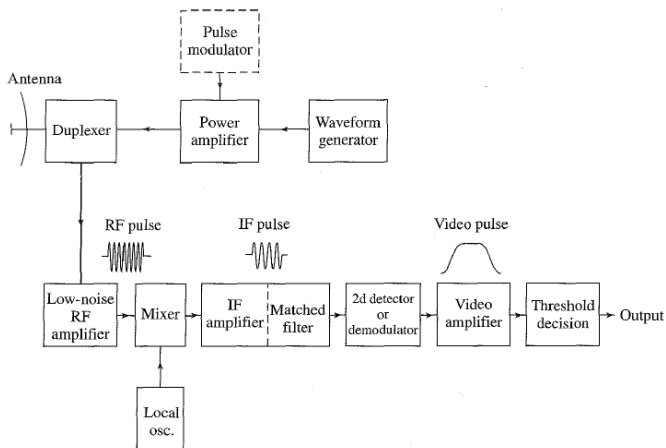
*Radio detection and ranging* (Radar) adalah sistem elektromagnetik untuk mendeteksi dan mendapatkan informasi lokasi target pantulan seperti pesawat terbang, kapal, kendaraan bermotor, manusia, dan atau lingkungan sekitar. Radar dioperasikan dengan meradiasikan gelombang elektromagnetik ke udara lalu mendeteksi sinyal *echo* yang diterima dari pantulan target. Sinyal pantulan yang diterima oleh radar tidak hanya menunjukkan adanya target, namun dengan membandingkan sinyal *echo* yang diterima dengan sinyal yang ditransmisikan, lokasi dari target dapat ditentukan bersamaan dengan

informasi lain dari target tersebut. Radar dapat dioperasikan baik pada jarak dekat maupun jauh dan dibawah kondisi seperti kegelapan, mendung, hujan, maupun bersalju. Kemampuan untuk mengukur jarak dengan akurasi tinggi dan dapat dioperasikan di segala cuaca menjadi keunggulan utama radar. Prinsip dasar sistem radar dapat dilihat melalui **gambar 2.9**



**Gambar 2.9** Sitem Radar [1]

Jarak radar ke target dapat ditentukan dengan menghitung waktu ketika sinyal tepat ditransmisikan ke target dan ketika kembali ke radar. Sedangkan lokasi dari target dalam sudut dapat ditentukan dari arah *narrow-beamwidth* antenna radar ketika menerima sinyal *echo* pada amplitudo maksimum.



**Gambar 2.10** Diagram Blok Radar [1]



## 2.2.1 Radar MIMO

### 2.2.1.1 Teknik MIMO

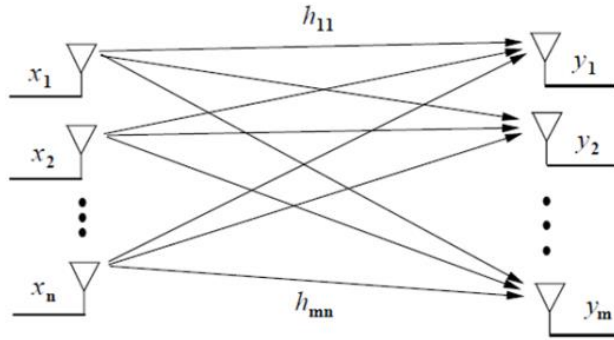
Sistem MIMO didefinisikan sebagai komunikasi *point-to-point* menggunakan banyak antena baik pada pemancar maupun penerima. Manfaat penggunaan banyak antena pada kedua sisi ini adalah untuk meningkatkan performa melalui sistem diversitas yang digunakan. Secara khusus, penelitian terakhir yang dilakukan menunjukkan bahwa sistem MIMO dapat secara signifikan meningkatkan kecepatan data pada sistem *wireless* tanpa meningkatkan daya pengiriman maupun *bandwidth*. Dampak dari meningkatnya kecepatan data ini adalah alokasi ruang tambahan dan tata letak untuk penempatan antena-antena serta parameter sistem yang lebih kompleks untuk pemrosesan sinyal multi-dimensi. Sistem komunikasi *point-to-point* pita sempit (*narrowband*) menggunakan  $n$  antena pemancar dan  $m$  antena penerima digambarkan dengan model waktu diskrit pada matriks di persamaan (2.21)

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & \cdots & h_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1 \\ \vdots \\ N_m \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

atau secara sederhana dapat ditulis pada persamaan (2.22)

$$\bar{y} = H\bar{x} + \bar{N} \quad (2.22)$$

dimana  $\bar{x}$  adalah *n-dimensional transmitted symbol*,  $\bar{N}$  adalah vektor *Additional White Gaussian Noise (AWGN)* yang besarnya  $m$ -dimensi, dan matriks kanal  $H$  adalah *zero mean (Rayleigh Fading) complex circular Gaussian random* dimana variabel  $h_{ij}$  merepresentasikan *gain* kanal dari antena pemancar  $j$  ke antena penerima  $i$ . Dengan asumsi melakukan normalisasi *noise* sehingga *noise covariance matrix* adalah sebuah matriks identitas, serta diasumsikan sisi penerima mampu untuk melakukan estimasi pada kanal  $H$  secara tepat, sehingga setiap elemen  $H$  dapat diidentifikasi. Dan sebagai catatan tambahan bahwa semua variabel diatas adalah proses stokastik. Sistem kanal MIMO dapat dilihat pada gambar 2.11



**Gambar 2.11** Kanal MIMO[13]

Sistem MIMO dengan antenna yang terletak pada satu tempat dengan posisi linier (*colocated antenna*) untuk sistem radar memiliki sejumlah keunggulan, yaitu kemampuan untuk menghasilkan resolusi yang tinggi, akurasi untuk mendeteksi target bergerak pelan yang tinggi, dan identifikasi parameter yang lebih mudah bila dibandingkan dengan radar *phased array*.

#### 2.2.1.2 Aplikasi Teknik MIMO dalam Sistem Radar

Radar MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) mempunyai karakteristik yaitu kemampuannya untuk mengirimkan sinyal yang saling independen dari banyak elemen pemancar yang memiliki diversitas spasial dan untuk mengamati sinyal yang diterima pada elemen penerima yang juga memiliki diversitas spasial.

Untuk radar dengan banyak elemen pemancar, maka sinyal yang ditransmisikan oleh pemancar harus saling orthogonal. Dua sinyal dikatakan saling orthogonal jika memenuhi persamaan (2.23)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_1(t) \varphi_2^*(t) dt = 0 \quad (2.23)$$

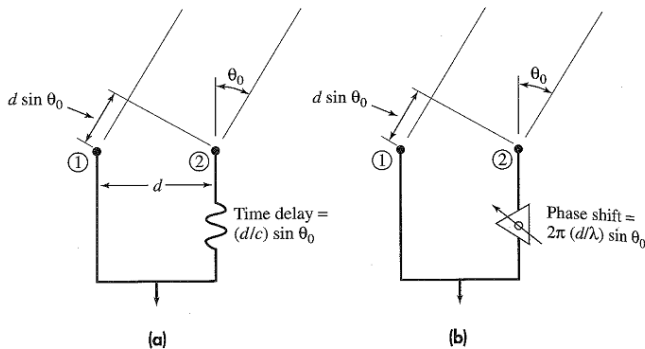
Ada tiga teknik untuk memaksimalkan orthogonalitas antar sinyal yang dikirimkan pemancar pada radar MIMO, yaitu dengan memanfaatkan waktu pancar (*Time Division Multiplexing*), frekuensi

sinyal (*Frequency Division Multiplexing*), dan/atau teknik pengkodean (*Code Division Multiplexing*).

Dengan radar MIMO, keuntungan yang didapatkan adalah kapasitas bandwidth yang semakin besar, resolusi radar yang semakin baik, dan kerja radar tetap maksimum ketika salah satu pemancar atau penerima mengalami kerusakan/*error*.

### 2.2.2 Radar Phased Array

Radar *phased array* merupakan radar yang menggunakan antenna *Phased array*. Antena *phased array* terdiri banyak antenna tetap yang dicatu secara koheren dan menggunakan pengaturan fase atau *time delay* pada setiap elemen antenna untuk mengarahkan *beam* pada sudut yang diinginkan. Control variabel amplitud kadang juga disediakan untuk membaentuk pola.



**Gambar 2.12** Beam steering pada radar *phased array* (a) menggunakan *time delay* (b) menggunakan *phase shifter*[3]

### 2.2.3 Radar Phased MIMO[8]

Sistem radar yang terdiri dari  $P$  antenna transmit dan  $R$  antenna receive yang ditempatkan saling berdekatan sehingga membentuk *collocated* radar. Radar *Phased MIMO* membagi *array* antenna transmit dalam ukuran *subarray* yang saling tumpang tindih. Masing-masing elemen dari ke  $N$  *subarray* akan mentransmisikan bentuk gelombang  $s_n(l)$  untuk membentuk beam yang mengarah pada target, dimana  $l = 1, 2, \dots, L$  adalah jumlah sampel dari masing-masing pulsa. Pada output sinyal baseband dapat diberikan

$$\mathbf{m}_n(\mathbf{t}) = \rho s_n(l) \tilde{\mathbf{w}}_n^* \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2.24)$$

Dimana  $s_n$  adalah sinyal yang di transmiskan oleh *subarray* ke  $n$ ,  $(.)^*$  adalah operator konjugasi dan  $\tilde{\mathbf{w}}_n$  adalah vektor bobot dengan bobot dalam bentuk kompleks.  $P \times 1$  vektor bobot ini terdiri dari  $P_n$  bobot untuk elemen dari *subarray* ke  $N$  dan  $P - P_n$  nol untuk semua elemen lainnya.  $\rho$  adalah energi yang diberikan pada setiap *subarray* yang dapat ditulis  $\rho = \sqrt{P/N}$ . Untuk menghasilkan sebuah beam dalam daerah medan jauh, sinyal yang ditransmisikan oleh *subarray* ke  $N$  pada sudut  $\theta$  menjadi

$$m_n(l, \theta) = \rho [\mathbf{w}_n^H \mathbf{u}_n(\theta)] s_n(l) \quad (2.25)$$

$\mathbf{u}_n$  adalah steering vektor yang diasosiasikan dengan *subarray* ke  $N$  dan  $\mathbf{w}_n$  hanya berisi bobot aktif untuk *subarray* ke  $N$ .

Sinyal yang dipantulkan oleh target pada sudut  $\theta$  adalah

$$m_r(l, \theta) = \rho \alpha(\theta) (\mathbf{x}(\theta)^T) \mathbf{s}_N(l) \quad (2.26)$$

$\mathbf{x}(\theta)$  dan  $\mathbf{s}_N(l)$  adalah vektor  $N \times 1$

$$\mathbf{x}(\theta) = [\mathbf{w}_1^H \mathbf{u}_1, \mathbf{w}_2^H \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{w}_N^H \mathbf{u}_N]^T \quad (2.27)$$

$$\mathbf{s}_N(l) = [\mathbf{s}_1(l), \mathbf{s}_2(l), \dots, \mathbf{s}_N(l)]^T \quad (2.28)$$

Jika target yang diinginkan berada pada  $\theta_t$  dan ada beberapa interferensi sebanyak  $Q$ , maka sinyal yang diterima pada *array* sebanyak  $R$  elemen antenna yang disebabkan oleh *subarray* bervariasi menjadi

$$\mathbf{g}_{US}(l) = m_n(l, \theta_t) \mathbf{v}(\theta_t) + \sum_{i=1}^Q m_r(l, \theta_i) \mathbf{v}(\theta_i) + \mathbf{n}_g(l) + \mathbf{c}_g(l) \quad (2.29)$$

$\mathbf{v}(\theta)$  merupakan steering vektor yang diterima. Dengan proses match filter pada  $N$  bentuk gelombang yang ditransmisikan oleh sisi *transmitter*, kita akan mendapatkan data vektor virtual dengan panjang  $N R \times 1$  yang diberikan sebagai

$$d_{US}(l) = \rho \alpha_t z(\theta_t) + \sum_{i=1}^Q \rho \alpha_i z(\theta_i) + \tilde{n} + \tilde{c} \quad (2.30)$$

Dimana

$$\mathbf{z}_{US}(\theta) = \mathbf{x}(\theta) \otimes \mathbf{v}(\theta) \quad (2.31)$$

Data vektor  $\mathbf{d}$  dapat diperoleh lagi dengan menyusun  $N$  vektor dari rumus  $g_{US}(l)$ ,  $z(\theta)$  adalah steering vektor virtual dan  $\tilde{n}$  vektor noise dengan panjang  $NR \times 1$  dan  $\tilde{c}$  adalah  $NR \times 1$  vektor kanal komunikasi. Jumlah elemen pada masing-masing *subarray*  $L = P - N + n$  dimana  $n = 1, 2, \dots, N$ .

Untuk *array* pada *transmit* dalam skema *overlap*, setiap elemen antenna harus mengirim kombinasi yang linear dari bentuk gelombang yang orthogonal. Jadi, sinyal yang ditransmisikan dari  $P$  antenna *transmit* dapat ditulis sebagai

$$\gamma(l) = \rho \mathbf{W}^* \mathbf{s}_n(l) \quad (2.32)$$

Dimana  $\gamma(l) = [\gamma_1(l), \dots, \gamma_P(l)]^T$  adalah vektor  $P \times 1$  dari bentuk gelombang dan  $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_K]$  adalah bobot matriks dari  $P \times N$  dan  $\mathbf{s}$  adalah sinyal yang ditransmisikan

### 2.3 Beamforming

Dalam pembentukan *beampattern* persamaan yang digunakan pada sisi *transmit*

$$B(\theta) = |\mathbf{w}_n^H \mathbf{u}_n(\theta)|^2 \quad (2.33)$$

Pembentukan *beampattern* pada sisi *transmit* memperhatikan jumlah elemen pada masing-masing *subarray*.

Pada sisi *receive* pembentukan *beampattern* memenuhi persamaan

$$B(\theta) = |\mathbf{w}_r^H \mathbf{z}(\theta)|^2 \quad (2.34)$$

### 2.3.1 Conventional Beamformer

*Conventional beamformer* merupakan metode *beamforming* dengan menggunakan bobot vektor yang memenuhi persamaan

$$\mathbf{w}_n = \frac{\mathbf{u}_n(\theta_t)}{\|\mathbf{u}_n(\theta_t)\|}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2.35)$$

Yang mana  $\mathbf{u}_n(\theta_t)$  merupakan *steering* vektor dari antenna aktif pada sistem. Persamaan diatas digunakan pada sisi *transmit*. Untuk sisi penerima memnuhi persamaan

$$\mathbf{w}_r = \mathbf{z}(\theta_t) = \mathbf{x}(\theta_t) \otimes \mathbf{v}(\theta_t) \quad (2.36)$$

$\mathbf{x}(\theta_t)$  merupakan *uplink steering* vektor yang dikalikan dengan sinyal baseband pada masing-masing antenna dan  $\mathbf{v}(\theta_t)$  merupakan *receive steering* vektor pada antenna penerima.

### 2.3.2 Algoritma MVDR (Minimum Variance Distortionless Respon)

*Beamforming* dapat dilakukan melalui teknik Capon yang memiliki kemiripan dengan algoritma *beamforming minimum variance distortionless response* (MVDR). Persamaan pembobotan untuk algoritma Capon adalah ( $\bar{\mathbf{w}} = [w_1 w_2 \dots w_M]^T$ ):

$$\mathbf{w}_r = \frac{\mathbf{C}_{i+n}^{-1}(\theta) \mathbf{z}(\theta_t)}{\mathbf{z}^H(\theta_t) \mathbf{C}_{i+n}^{-1}(\theta) \mathbf{z}(\theta_t)} \quad (2.37)$$

$\mathbf{C}_{i+n}$  adalah matriks interferensi ditambah dengan kovarian *noise* yang akan diestimasi menjadi  $\hat{\mathbf{C}} = \sum_{j=1}^J \mathbf{d}_j \mathbf{d}_j^H$ , dimana  $\{\mathbf{d}_j\}_{j=1}^J$  adalah potret data yang diperoleh dari  $J$  radar pulsa yang berbeda.

*Minimum variance* menggunakan sebagian (tidak semua) derajat yang bebas untuk membentuk *beam* pada arah yang diinginkan dan pada saat bersamaan menggunakan derajat yang tersisa untuk membentuk *nulls* pada arah kedatangan sinyal pengganggu (*interfererence signal*). Teknik ini mampu mengurangi efek interferensi dengan meminimalkan daya keluaran dan mengkonsentrasikan gain ke arah yang diinginkan. Sifat estimasi *maximum likelihood* digunakan terhadap persamaan pembobotan sinyal karena perhitungan terhadap satu arah sinyal yang

diinginkan dilakukan dengan mengasumsikan sinyal lain sebagai *interfererence* (pengganggu). Tujuan MVDR adalah memaksimalkan *signal-to-interfererence ratio* (SIR) ketika meloloskan sinyal yang diinginkan dalam kondisi *undistorted* baik fase maupun amplitudonya.

Istilah *distortionless* digunakan ketika diinginkan sinyal yang diterima berada dalam kondisi tidak terdistorsi setelah dipengaruhi oleh *array weights*. Tujuan diberlakukannya algoritma adalah untuk meminimalkan variasi noise di keluaran array. Hal ini dapat dicapai dengan mengasumsikan sinyal yang diinginkan maupun tidak diinginkan memiliki nilai *zero mean*.

## 2.4 SINR

SINR (*Signal to Interference Plus Noise Ratio*) merupakan daya sinyal yang diterima dibandingkan dengan penjumlahan daya interferensi dan daya noise. SNR (*Signal to Noise Ratio*) merupakan daya sinyal yang diterima dibandingkan dengan daya *noise*. SINR dan SNR saling berhubungan dimana semakin tinggi nilai SNR, SINR juga akan semakin tinggi. Secara matematis SINR dapat diperoleh dari persamaan 2.36.

$$SINR = \frac{\rho^2 \beta_t^2 |\mathbf{w}_r^H \mathbf{z}(\theta_s)|^2}{\mathbf{w}_r^H \mathbf{C}_{i+n} \mathbf{w}_r} \quad (2.38)$$

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas metodologi dalam melakukan simulasi *beamforming* pada sistem radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi dengan menggunakan MatLab. Simulasi ini bertujuan untuk mendapatkan performansi sistem radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi dilihat dari nilai *mainbeam*, level *sidelobe* dan SINR. Hasil yang didapatkan dibandingkan dengan sistem radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray transmit* serbasama, radar MIMO, dan radar *phased* array.

### 3.1 Pemodelan Sistem

#### 3.1.1 Parameter Sistem Radar

Pada tugas akhir ini akan dilakukan simulasi radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi. Radar *phased* MIMO merupakan metode baru yang mana radar *phased* MIMO menggabungkan keunggulan radar *Phased array* yang memiliki keunggulan dalam pemrosesan gain koheren pada sisi *transmit* dan keunggulan radar MIMO yaitu dengan menggunakan sinyal yang berbeda-beda (diversity).

**Tabel 3.1** Spesifikasi sistem radar

Spesifikasi	Simbol	Nilai	Keterangan
Antena pemancar	P	10	Buah
Antena penerima	R	10	Buah
Jumlah <i>subarray</i> radar	N	1, 5, 10	Buah
Jumlah sampel sinyal pulsa	L	400	Sampel
Spasi antar antena	d	$0,5 \lambda$	Meter
Sudut target	$\theta_t$	0	Derajat
Sudut sumber interferensi	$\theta_i$	-40 dan -10	Derajat
Daya noise	P <sub>noise</sub>	1	Watt
Daya interferensi	P <sub>int</sub>	-30 dan 30	Watt
SNR	S	[-30, -20, -10, 0, 10, 20, 30]	dB

Antena yang digunakan diasumsikan sebagai antena isotropis yang mempunyai pola radiasi *omnidirectional* untuk memudahkan dalam proses simulasi. Antenna dirancang membentuk *uniform linier*



array dengan spasi antar elemen  $0,5 \lambda$ . Dalam merancang simulasi *beamforming* pada sistem radar dalam tugas akhir ini, ditentukan spesifikasi radar terlebih dahulu seperti pada tabel 3.1.

### 3.1.2 Pengaturan Jumlah Subarray Transmit

Dalam memodelkan sistem radar yang digunakan dalam simulasi, pengaturan jumlah *subarray transmit* ( $N$ ) merupakan pokok dalam simulasi ini. Radar *phased array* merupakan *uniform linier array* yang masing-masing antenna mentransmisikan sinyal yang saling koheren sehingga diperoleh  $N = 1$ . Radar MIMO menggunakan antenna yang independen sehingga  $N = P = 10$ . Pada radar *phased* MIMO, *subarray* harus memiliki jumlah antenna lebih dari 1 sehingga diperoleh  $N = 2, \dots, 10$ . Pada tugas akhir ini, ditentukan untuk penggunaan radar *phased* MIMO dengan jumlah  $N = 5$ .

Pengaturan jumlah elemen *subarray* pada sistem radar dapat diperoleh dari persamaan

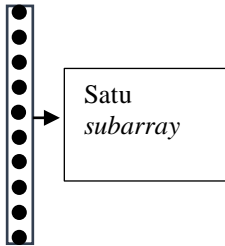
$$M_{sub} = P - N + k \quad (3.1)$$

dimana

- $M_{sub}$  = jumlah antenna dalam satu *subarray*
- $P$  = jumlah antenna *transmit*
- $N$  = jumlah *subarray*
- $k = \begin{cases} 1 & \text{untuk semua sistem radar} \\ 1, \dots, P - N & \text{untuk } \textit{phased} \text{ MIMO bervariasi} \end{cases}$

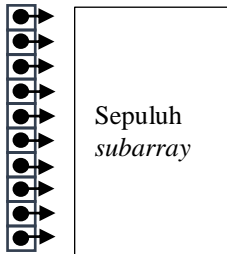
Pengaturan jumlah *subarray* ini menghasilkan jumlah elemen antenna yang berbeda-beda dalam *subarray* pada masing-masing sistem radar. Dari persamaan (3.1) diperoleh:

- a. Radar *phased array* terdiri dari 1 *array* yang memiliki 10 antenna.



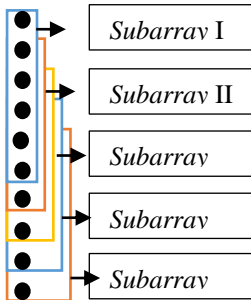
**Gambar 3.1** Skema transmit radar *phased array*

- b. Radar MIMO terdiri dari 10 *subarray* dengan masing-masing elemen 1 antenna.



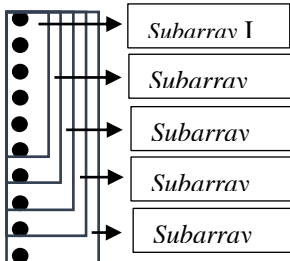
**Gambar 3.2** Skema transmit radar MIMO

- c. Radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray* transmit serbasama terdiri dari 5 *subarray* dan masing-masing *subarray* terdiri dari 6 elemen. *Subarray* tersebut diatur agar saling *overlap* dan antar *subarray* satu dengan yang lainnya selalu bergeser satu elemen.



**Gambar 3.3** Skema transmit radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray* transmit serbasama

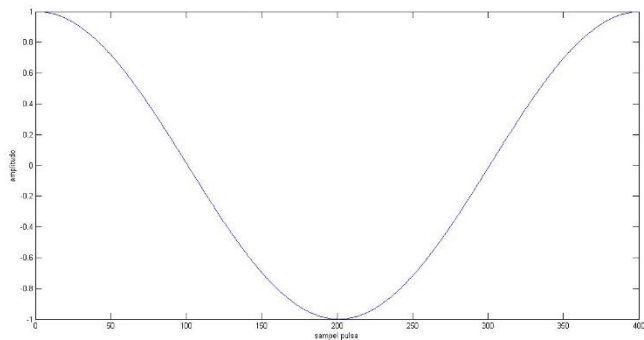
- d. Radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray* transmit bervariasi terdiri dari 5 *subarray* yang saling *overlap* dan jumlah elemen dari *subarray* baru selalu lebih besar 1 dari *subarray* sebelumnya.



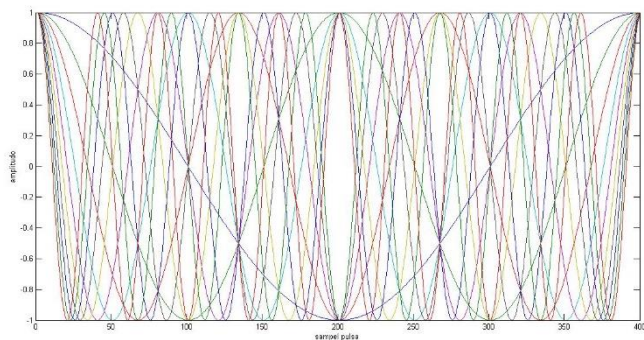
**Gambar 3.4** Skema transmit radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray* transmit bervariasi

### 3.1.3 Sinyal Transmit

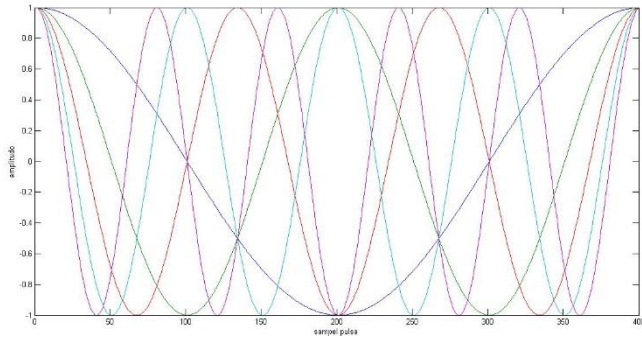
Sinyal yang digunakan pada sistem ini adalah sinyal *orthogonal*. Sinyal *orthogonal* digunakan agar tidak terjadi interferensi antar sinyal yang dikirimkan pada skema sistem MIMO. *Diversity* sistem juga akan terbentuk dari adanya orthogonalitas sinyal yang disebut *waveform diversity*. Berikut adalah plot sinyal *baseband* untuk masing-masing sistem radar.



**Gambar 3.5.** Sinyal radar *Phased array*



**Gambar 3.6.** Sinyal radar MIMO



**Gambar 3.7.** Sinyal radar phased-MIMO ( $N=5$ )

### 3.1.4 Sinyal Pantul Dari Target

Sinyal pantul dari target merupakan sinyal pulsa yang dikirimkan dari sistem radar yang dikalikan dengan koefisien pantul dari target. Koefisien pantul diasumsikan terdistribusi *uniform* yang memiliki rentang 0 – 1. Pemodelan sinyal pantul dari target sesuai dengan persamaan (2.23)

### 3.1.5 Sinyal Pada *Receiver*

Sinyal pada receiver akan mengalami penambahan *noise* dan interferensi. *Noise* yang timbul merupakan *noise thermal* pada *receiver* yang merupakan *noise* AWGN dengan daya noise sebesar 1 watt. Interferensi dimodelkan berasal dari sudut-sudut yang ditentukan yaitu  $-40^\circ$  dan  $-10^\circ$  dengan 2 variasi daya yaitu -30dB dan 30dB. Variasi daya interferensi digunakan dalam 2 skema pengujian yakni dominan *noise* dan dominan interferensi.

## 3.2 Szenario Pengujian Sistem Radar

### 3.2.1 Menampilkan Pengujian *Beampattern*

#### 3.2.1.1 *Transmit Beampattern*

*Transmit beampattern* merupakan pola daya ketika sistem memancarkan sinyal. Pola daya pancaran sinyal sangat penting untuk di analisis untuk mengetahui performansi sistem radar. Dalam menampilkan plot transmit *beampattern* mengacu pada persamaan 2.33 dan 2.35.

### 3.2.1.2 Diversity Beampattern

Pengaruh adanya waveform diversity dapat diketahui dari diversity beampattern. Dalam menampilkan plot transmit beampattern mengacu pada persamaan 2.33 dan 2.35. Namun, berbeda dengan transmit beampattern, pada diversity beampattern  $\mathbf{u}_n(\theta_t)$  merupakan steering vector dari subarray dimana subarray diatur untuk mengirimkan sinyal yang unik.

### 3.2.1.3 Overall Beampattern (Conventional)

Dalam menampilkan plot transmit beampattern mengacu pada persamaan 2.34 dan 2.36. Pada persamaan 2.36 terlebih dahulu harus dilakukan normalisasi terlebih dahulu.

### 3.2.1.4 Overall Beampattern (MVDR)

Dalam menampilkan plot transmit beampattern mengacu pada persamaan 2.34 dan 2.37.

## 3.2.2 Perhitungan HPBW

Langkah-langkah mendapatkan nilai HPBW dari beampattern:

1. Memilih beampattern yang akan dicari nilai HPBW-nya
2. Melakukan zooming pada mainlobe
3. Mencari nilai -3dB sebelah kiri dari puncak mainlobe
4. Catat nilai derajat sumbunya
5. Mencari nilai -3dB sebelah kanan dari puncak mainlobe
6. Catat nilai derajat sumbunya
7. Hitung selisih derajat langkah 5 dan 7.

## 3.2.3 Perhitungan Level Sidelobe

Langkah-langkah mendapatkan nilai level sidelobe dari beampattern:

1. Memilih beampattern yang akan dicari level sidelobe-nya.
2. Melakukan zooming pada sidelobe pertama (asumsi sidelobe sebelah kiri dan kanan identik)
3. Mencari nilai puncak dari sidelobe pertama
4. mencatat level sidelobe(dB).

### 3.2.4 Perhitungan SINR

Dalam mendapatkan kinerja sistem radar dilihat dari nilai SINR, ditentukan nilai SNR terlebih dahulu seperti pada tabel 3.1 dan dibuat dua skenario simulasi yakni, daya INR (interference to noise ratio) > daya *noise* (dominan interferensi) dan daya INR < daya *noise* (dominan *noise*) agar terlihat ketahanan sistem radar terhadap interferensi sinyal. Bobot *downlink* sistem radar juga memiliki dua skema yakni MVDR dan *conventional*. Dari bobot *downlink* ini dapat diperoleh nilai SINR MVDR atau SINR *conventional*. Dalam menentukan nilai SINR persamaan yang digunakan adalah persamaan 2.38.

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## BAB 4

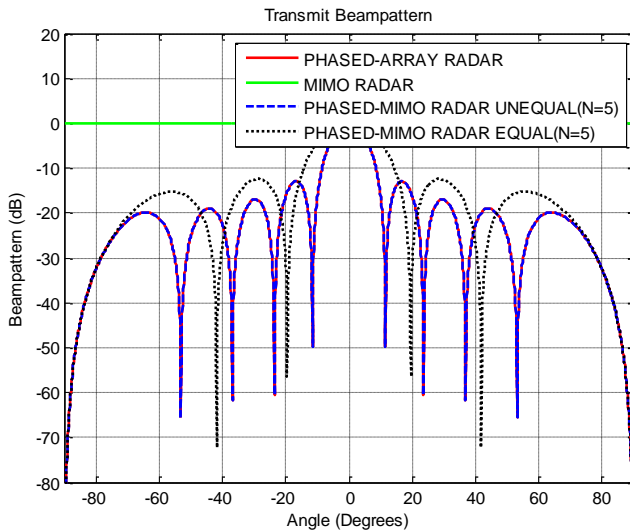
### ANALISIS HASIL SIMULASI

Pada bab ini, dilakukan pembahasan mengenai analisis hasil simulasi kinerja radar *Phased array*, MIMO, dan *Phased -MIMO* dengan ukuran subarray bervariasi serta *Phased MIMO* dengan ukuran subarray serbasama dilihat dari lebar *mainbeam*, level *sidelobe*, dan SINR.

#### 4.1 *Beampattern*

##### 4.1.1 *Transmit Beampattern*

Perbandingan HPBW dari sistem radar diuji untuk menunjukkan sistem radar mana yang memiliki gain paling baik. Semakin kecil nilai HPBW maka semakin bagus gain sistem radar yang digunakan.



**Gambar 4.1** *Transmit Beampattern*

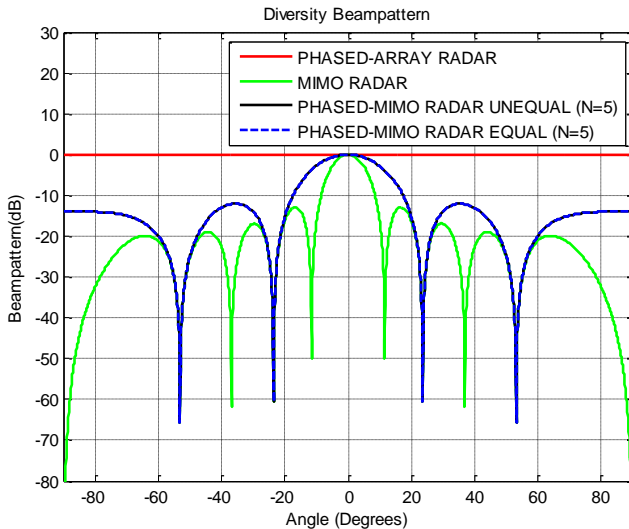
Dari gambar 4.1 dapat dilihat bahwa banyak jumlah antenna dalam subarray memengaruhi gain dan banyaknya jumlah *sidelobe*. Semakin banyak jumlah antenna semakin tinggi gain yang mana gain



diwakili oleh *half power beamwidth* dan juga semakin banyak jumlah *sidelobe* yang dimiliki serta semakin rendah level *sidelobe*-nya. Terlihat dalam gambar bahwa performansi sistem radar *Phased array* dan *Phased MIMO* dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi memiliki kinerja paling baik dikarenakan jumlah antenna yang digunakan dalam *subarray* sama dan paling banyak. Radar MIMO memiliki kinerja paling buruk dikarenakan antenna pada radar MIMO saling independen sehingga tidak tampak beam pattern pada sisi *transmit*. Performansi radar *Phased MIMO* dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi lebih baik dibandingkan sistem radar *Phased MIMO* dengan ukuran *subarray transmit* serbasama. Dapat dilihat dari level *sidelobe* dan juga level gain, level *sidelobe* radar *Phased MIMO* dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi lebih rendah dan level gain yang dimiliki lebih tinggi.

#### 4.1.2 Diversity Beam pattern

*Diversity beam pattern* dari sistem radar dapat dilihat pada gambar



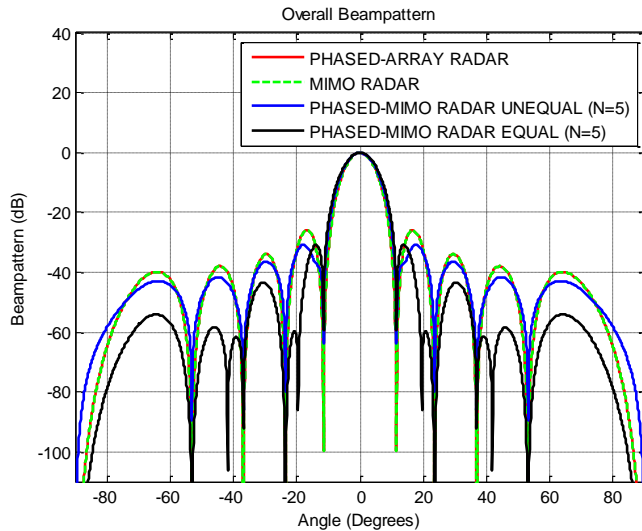
**Gambar 4.2** Diversity Beampattern

*Diversity beam pattern* untuk radar *Phased MIMO* dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi dan serbasama memiliki *pattern* yang

sama. Hal itu dikarenakan sistem radar tersebut memiliki jumlah *subarray* yang sama yaitu lima.

#### 4.1.3 Overall Beampattern (Conventional)

Gambar 4.3 adalah plot overall *beampattern* dengan menggunakan *conventional beamformer*.



**Gambar 4.3** Overall Beampattern (conventional)

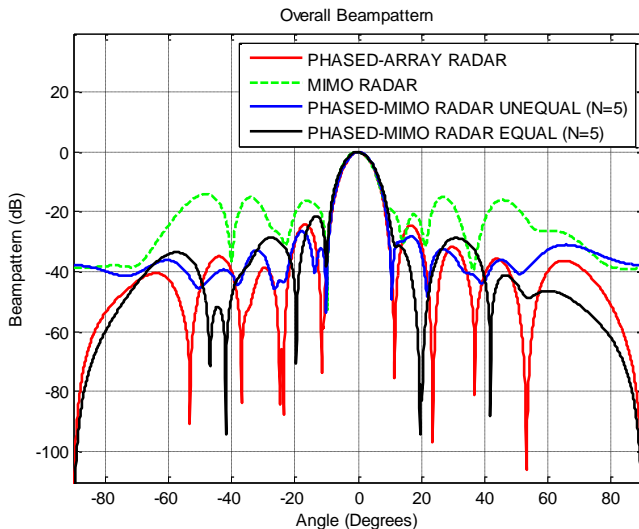
Pengujian pertama yaitu pembentukan beam overall dengan *conventional beamformer*. Gambar 4.3 merupakan gambar overall *beampattern* menggunakan *conventional beamformer*. Dari gambar 4.3 radar MIMO dan radar *Phased array* memiliki *beampattern* yang sama di mana radar tersebut memiliki kualitas yang lebih bagus dari radar *Phased MIMO* dengan *subarray transmit* bervariasi pada nilai HPBW. Untuk level *sidelobe*, radar *Phased MIMO* dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi memiliki kinerja yang lebih baik.

Untuk perbandingan overall *beampattern* radar *Phased MIMO* dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi dan serbasama menggunakan *conventional beamformer* pada daya interferensi -30 dB dapat dilihat pada gambar 3.9. Dari gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa performa kedua sistem radar memiliki performa yang hampir

sama. Radar *Phased MIMO* dengan *subarray transmit* bervariasi memiliki gain sedikit lebih bagus. Namun, level *sidelobe* yang dimiliki sedikit lebih tinggi.

#### 4.1.4 Overall Beampattern (MVDR)

Pengujian selanjutnya dengan menggunakan MVDR *beamformer*. Digunakan daya interferensi sebesar -30 dB yang berarti interferensi tidak begitu berpengaruh pada sistem radar. Dapat dilihat pada gambar 4.4 bahwa tidak terjadi *nulling* pada sudut-sudut sumber interferensi dikarenakan daya interferensi yang rendah.

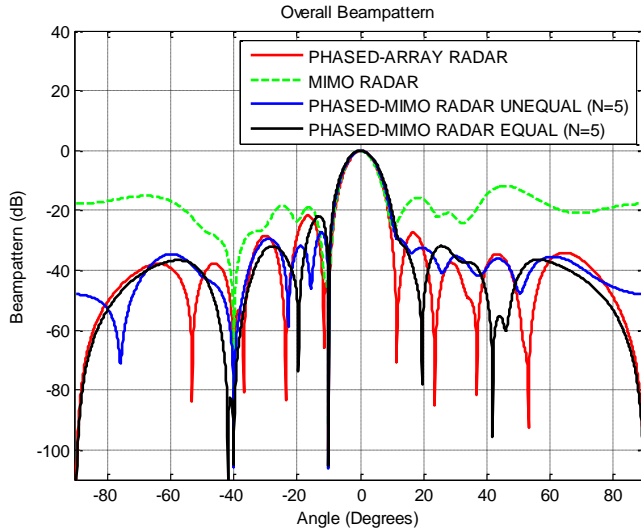


**Gambar 4.4** Overall *beampattern* (MVDR) daya interferensi -30 dB

Dari gambar 4.4 radar *Phased MIMO* dengan *subarray transmit* bervariasi memiliki level *sidelobe* paling rendah sedangkan radar MIMO memiliki level *sidelobe* paling tinggi. Untuk HPBW pada sistem radar tidak begitu besar perbedaannya

Untuk perbandingan radar *Phased MIMO* dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi dan serbasama, radar *Phased MIMO* dengan *subarray transmit* bervariasi memiliki kinerja yang lebih bagus pada level gain dan HPBW seperti yang terlihat pada gambar 3.11

Pengujian selanjutnya yaitu dengan menggunakan daya interferensi lebih besar dari daya noise, sebesar 30 dB. Hal ini bertujuan agar dapat dimodelkan *beampattern* yang adaptif terhadap interferensi sehingga terdapat nulling (interferensi dapat ditekan seminimal mungkin) pada sudut sumber interferensi.



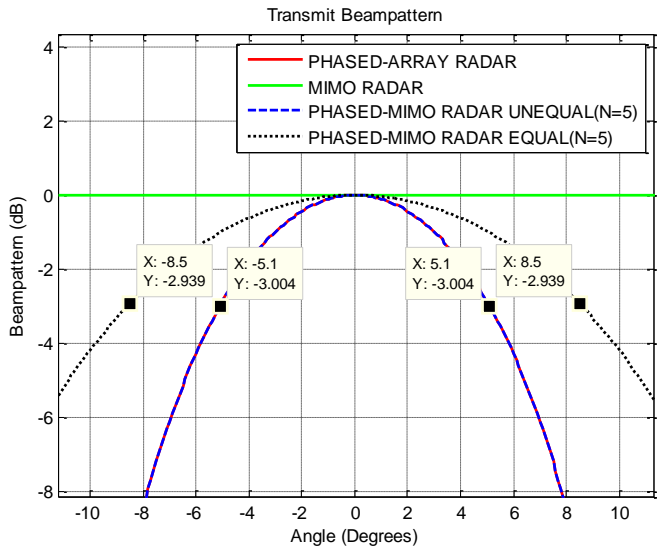
**Gambar 4.5** Overall *beampattern* (MVDR) daya interferensi 30 dB

Dengan menggunakan MVDR *beamformer* maka dapat dilihat bagaimana interferensi ditekan seminimal mungkin pada sudut kedatangannya sehingga tampak *null-null* pada sudut kedatangan interferensi. Hal tersebut sesuai dengan tujuan penggunaan MVDR yakni memaksimalkan *gain* pada sudut target dan meminimalkan daya pada sudut kedatangan interferensi

4.2 Half Power Beamwidth (HPBW)

4.2.1 HPBW Transmit Beampattern

Transmit beampattern memberikan gambaran pola pancaran daya dari pemancar sistem radar yang dianalisis.



Gambar 4.6 HPBW transmit beampattern

Dari gambar 4.6 diperoleh data kinerja sistem radar yang dianalisis. Analisis dilakukan pada nilai lebar *mainbeam* atau HPBW.

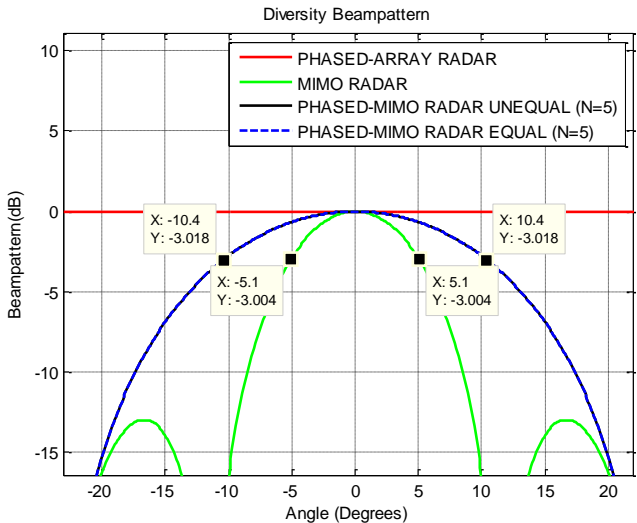
Tabel 4.1 HPBW transmit beampattern

Sitem radar	HPBW
Phased array	10,2 <sup>0</sup>
MIMO	-
Phased MIMO dengan ukuran subarray serbasama	17 <sup>0</sup>
Phased MIMO dengan ukuran subarray bervariasi	10,2 <sup>0</sup>

Dari tabel 4.1 diperoleh bahwa HPBW dari radar *Phased array* dan *Phased MIMO* dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi pada *transmit beampattern* paling bagus dengan beamwidth 10,2<sup>0</sup>. Hal itu dikarenakan elemen antenna yang digunakan lebih banyak, sehingga lebar beam semakin sempit.

4.2.2 HPBW Diversity Beampattern

Diversity beampattern diperoleh dari adanya *orthogonalitas* pada sinyal yang dikirimkan. *Orthogonalitas* sinyal akan membentuk *waveform diversity*. *Diversity beampattern*



Gambar 4.7 HPBW diversity beampattern

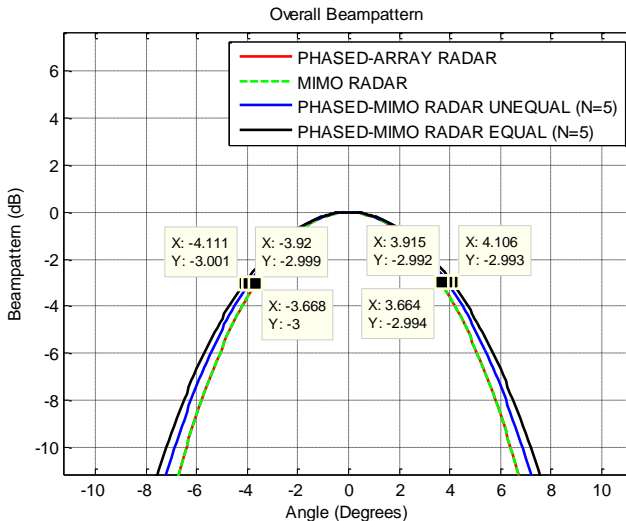
Tabel 4.2 HPBW diversity beampattern

Sitem radar	HPBW
Phased array	-
MIMO	10,2 <sup>0</sup>
Phased MIMO subarray serbasama	20,8 <sup>0</sup>
Phased MIMO subarray bervariasi	20,8 <sup>0</sup>

Dari tabel 4.2 diperoleh bahwa *diversity beampattern* pada MIMO radar memiliki gain paling tinggi. Hal itu disebabkan elemen antenna pada mimo radar merupakan *antenna* yang saling independen yang menyebabkan timbulnya *diversity*. Pada kedua radar *Phased* MIMO juga terdapat *diversity beampattern* namun gain yang dimiliki tidak sebagus gain pada radar MIMO. Pada radar *Phased array* muncul

*flat pattern* dikarenakan dianggap satu *array* yang elemen antenanya saling koheren.

#### 4.2.3 HPBW Overall Beampattern



**Gambar 4.8** HPBW overall beampattern conventional

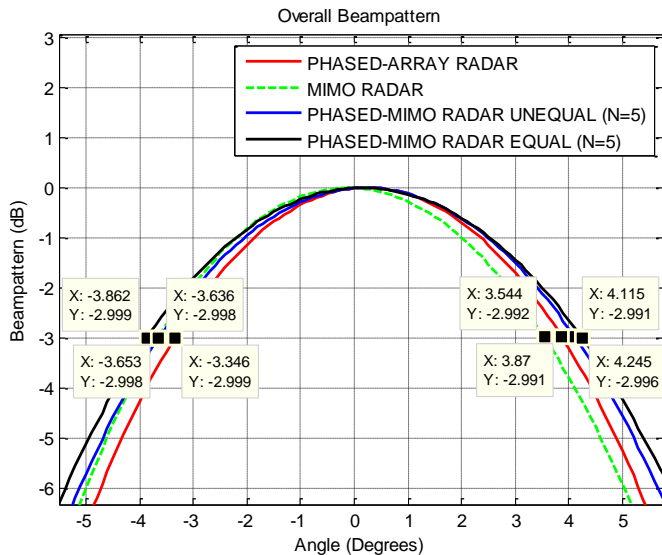
Dari gambar 4.8 dapat dilihat bahwa HPBW paling sempit dimiliki oleh radar *phased array* dan MIMO dengan nilai yang sama. Selanjutnya radar *phased MIMO* dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi dan yang paling lebar dimiliki radar *phased MIMO* dengan ukuran *subarray* serbasama. Nilai HPBW dari masing-masing sistem radar dapat dilihat pada tabel 4.3

**Tabel 4.3** HPBW overall beampattern (conventional)

Sitem radar	HPBW
<i>Phased array</i>	$7.332^0$
MIMO	$7.332^0$
<i>Phased MIMO subarray</i> serbasama	$8.217^0$
<i>Phased MIMO subarray</i> bervariasi	$7.835^0$

Pengujian selanjutnya yakni dengan menggunakan MVDR *beamformer*. MVDR *beamformer* digunakan dengan tujuan untuk

meminimalkan daya pancar pada sudut kedatangan interferensi dan memaksimalkan gain pada sudut target. Dengan menggunakan MVDR *beamformer* diperoleh nilai HPBW seperti pada gambar 4.6



**Gambar 4.9** HPBW Overall beampattern (MVDR)

Dari gambar 4.9 diperoleh nilai HPBW dari radar MIMO dan *phased array* yang memiliki kelebaran yang hampir sama sedangkan pada radar *phased MIMO*, lebar HPBW pada ukuran *subarray transmit* bervariasi sedikit lebih sempit dibandingkan dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi. Hal ini dipengaruhi dari perkalian *beampattern transmit* dan diversity yang mempengaruhi received steering vektor. Nilai HPBW dari sistem radar dapat dilihat pada tabel 4.4.

**Tabel 4.4** HPBW overall beampattern (MVDR)

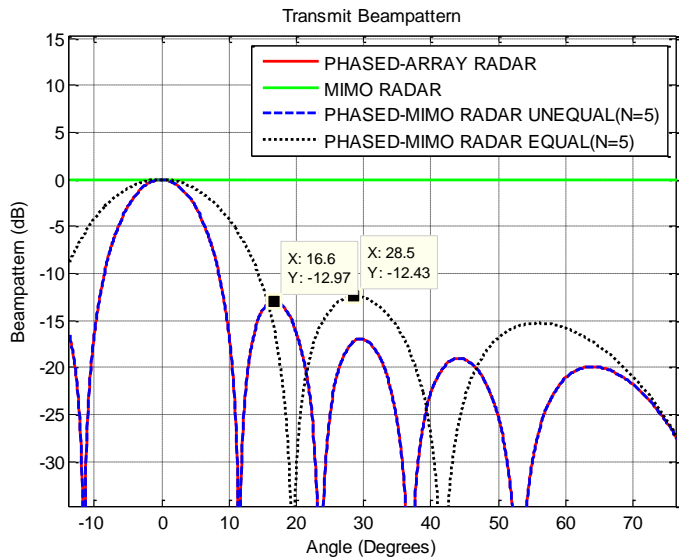
Sitem radar	HPBW
<i>Phased array</i>	7.216 <sup>0</sup>
MIMO	7.217 <sup>0</sup>
<i>Phased MIMO subarray</i> serbasama	8.107 <sup>0</sup>
<i>Phased MIMO subarray</i> bervariasi	7.751 <sup>0</sup>



4.3 Level Sidelobe

4.3.1 Level Sidelobe Transmit Beampattern

Beam yang sangat berpengaruh pada interferensi adalah beam pada sisi *sidelobe*. Sistem radar yang baik perlu untuk memiliki nilai *sidelobe* yang rendah dengan tujuan untuk mengurangi nilai interferensi.



Gambar 4.10 Level sidelobe transmit beampattern

Untuk memperoleh level sidelob yang rendah maka digunakan antenna *array* dengan jumlah yang lebih banyak. Penggunaan antenna *array* akan sangat membantu dalam pengaturan level *sidelobe*.

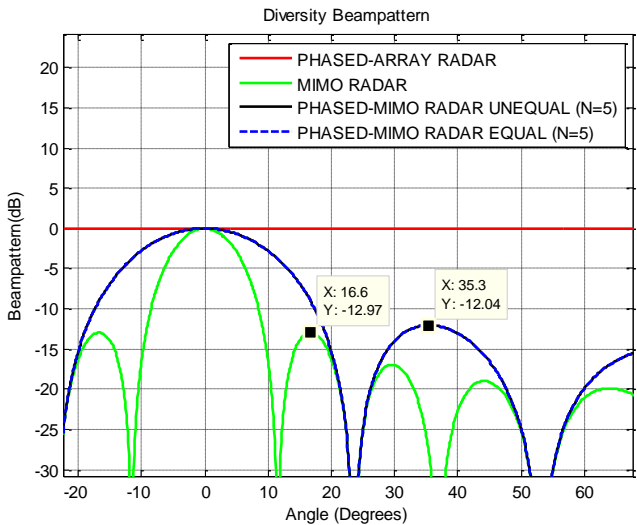
Tabel 4.5 Level sidelobe transmit beampattern

Sitem radar	Level sidelobe
Phased array	-12,97 dB
MIMO	0
Phased MIMO subarray serbasama	-12,43dB
Phased MIMO subarray bervariasi	-12,97 dB

Dari tabel 4.5 level *sidelobe* paling rendah pada radar *Phased array* dan *Phased MIMO* dengan ukuran subarray *transmit* yang

bervariasi. Hal itu dikarenakan jumlah antenna yang digunakan pada susunan *array* linier semakin banyak.

4.3.2 Level *Sidelobe Diversity Beampattern*



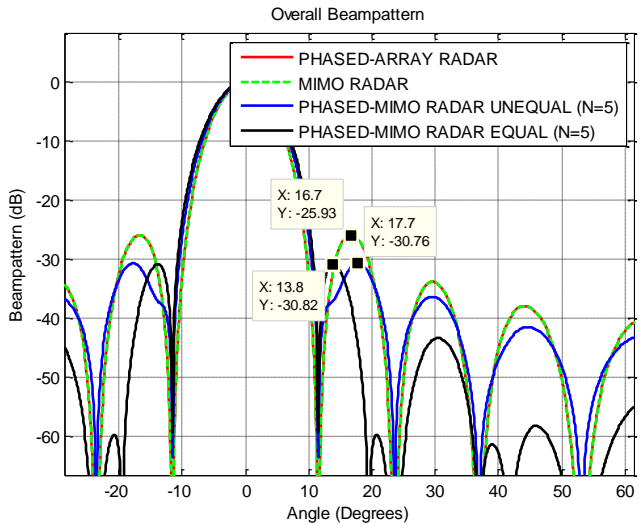
Gambar 4.11 Level *sidelobe diversity beampattern*

Dari gambar 4.11 dapat dilihat bahwa level *sidelobe* dari radar MIMO memiliki nilai yang paling rendah dikarenakan jumlah antenna yang digunakan paling banyak. Pada kedua radar *phased* MIMO memiliki level *sidelobe* yang sama dikarenakan jumlah *subarray* yang digunakan masing-masing berjumlah lima. Radar *Phased array* tidak memiliki level *sidelobe* karena terdiri dari satu ULA yang elemennya saling koheren.

Tabel 4.6 Level *sidelobe diversity beampattern*

Sitem radar	Level <i>sidelobe</i>
<i>Phased</i> array	-
MIMO	-12,97 dB
<i>Phased</i> MIMO <i>subarray</i> serbasama	-12,4 dB
<i>Phased</i> MIMO <i>subarray</i> bervariasi	-12,4 dB

4.3.3 Level Sidelobe Overall Beampattern

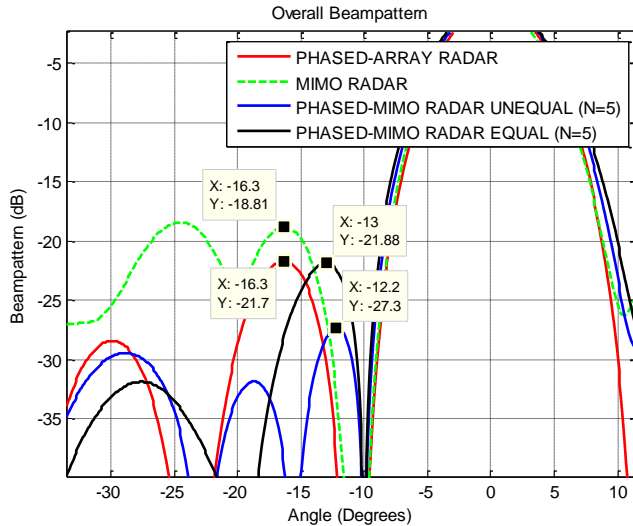


Gambar 4.12 Level *sidelobe* pada overall beampattern (conventional)

Dari gambar 4.12 diperoleh bahwa level *sidelobe* pada radar MIMO dan *phased array* memiliki nilai yang sama. Nilai *sidelobe* paling rendah dimiliki oleh radar *phased MIMO* dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi.

Tabel 4.7 Level *sidelobe* pada overall beampattern (conventional)

Sitem radar	Level <i>sidelobe</i>
<i>Phased array</i>	-25,93
MIMO	-25,93
<i>Phased MIMO subarray</i> serbasama	-30,82
<i>Phased MIMO subarray</i> bervariasi	-30,76



**Gambar 4.13** Overall beampattern (MVDR)

Diperoleh bahwa sidelobe pada radar *phased* MIMO dengan ukuran subarray *transmit* bervariasi memiliki nilai yang paling rendah dari semua sistem radar sehingga radar *phased* MIMO dengan ukuran subarray *transmit* bervariasi sangat bagus digunakan untuk mengatasi interferensi. Nilai yang diperoleh sesuai dengan tabel 4.8.

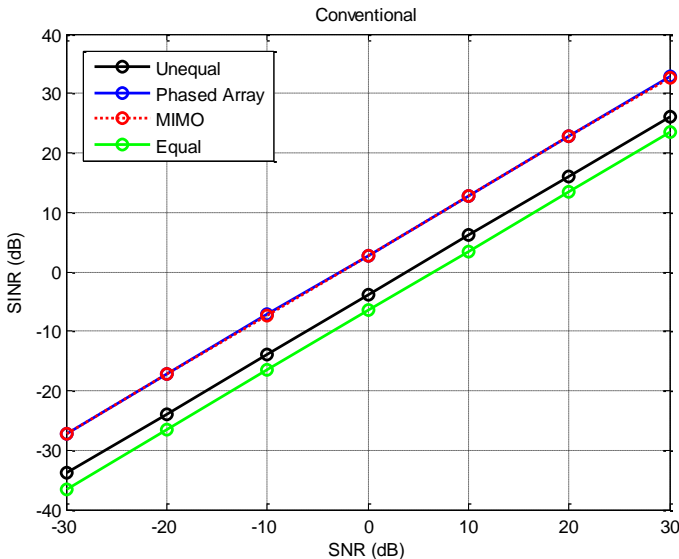
**Tabel 4.8** Level sidelobe pada overall beampattern (MVDR)

Sistem radar	Level sidelobe
Phased array	-21,7
MIMO	-18,81
Phased MIMO subarray serbasama	-21,88
Phased MIMO subarray bervariasi	-27,3

#### 4.4 Hasil perhitungan SINR

Nilai SINR menunjukkan ketahanan sistem radar terhadap adanya *interference* dan *noise*. Untuk mengetahui kinerja dari sistem radar pada tugas akhir ini dilihat dari parameter SINR, diberikan skenario simulasi. Parameter SNR ditentukan pada nilai -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30 dengan satuan dB. Sudut target  $0^\circ$  dan sudut interferensi  $-40^\circ$  dan  $-10^\circ$ . Daya noise berada pada nilai 1 watt. Daya interferensi yang digunakan -30 dan 30 watt.

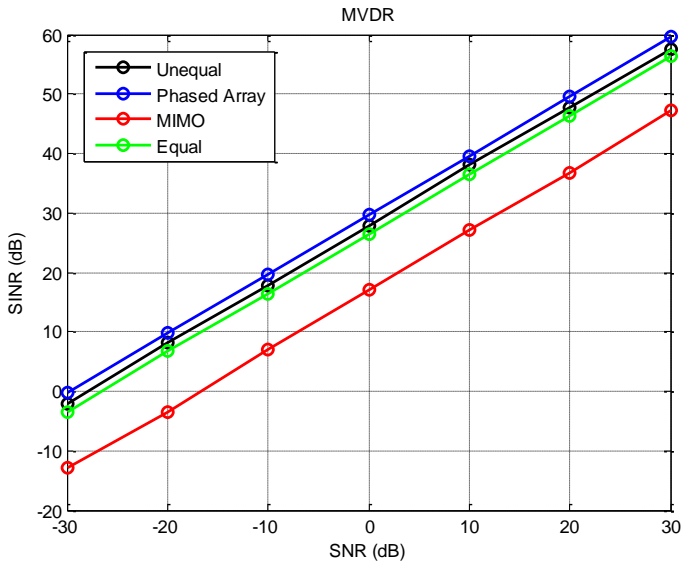
##### 4.4.1 Daya Interferensi Lebih Tinggi Dari Daya Noise



Gambar 4.14 SINR *conventional*

Dari gambar 4.14 diperoleh bahwa nilai SINR radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi berada di antara radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray transmit* serba sama dan radar MIMO serta radar *phased array* dimana radar MIMO dan *phased array* memiliki nilai SINR yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja SINR ukuran *subarray transmit* bervariasi lebih bagus dibandingkan dengan ukuran *subarray transmit* serbasama dikarenakan pada ukuran *subarray transmit* bervariasi dihasilkan *multiple beam* yang

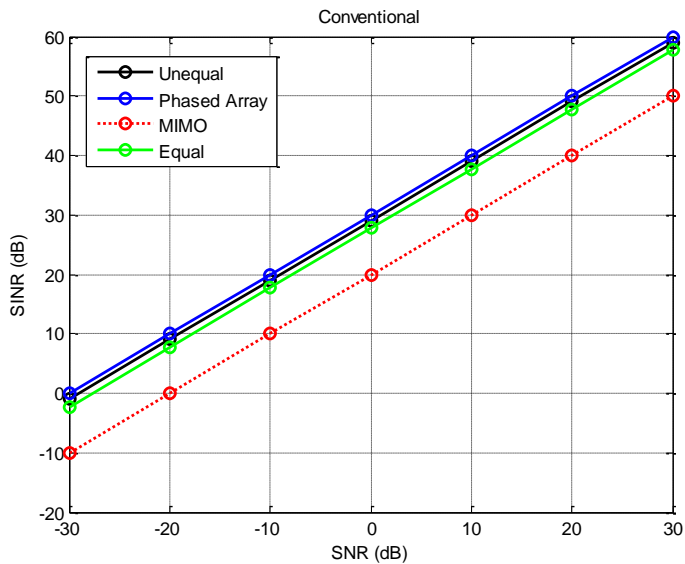
memiliki lebar *mainbeam* yang berbeda-beda sehingga kemampuan untuk mendeteksi target lebih baik dan menyebabkan SINR yang diperoleh lebih bagus.



**Gambar 4.15 SINR MVDR**

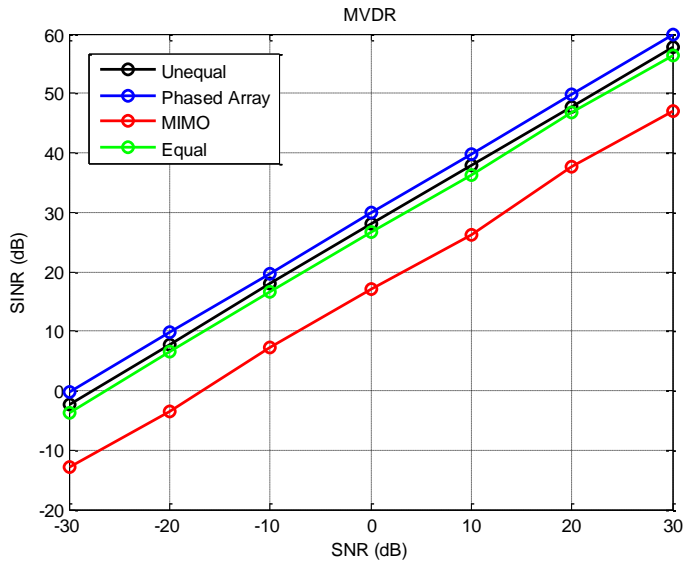
Dari gambar 4.15 diperoleh bahwa radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi memiliki nilai SINR di bawah radar *phased array* serta di atas radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray transmit* serbasama dan radar MIMO

4.4.2 Daya Interferensi Lebih Rendah Dari Daya Noise



Gambar 4.16 SINR conventional

Gambar 4.16 menunjukkan bahwa radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi memiliki nilai SINR dibawah *phased array* radar tetapi di atas radar mimo dan *phased* MIMO dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi.



**Gambar 4.17** SINR MVDR

Gambar 4.17 menunjukkan nilai SINR radar dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi lebih bagus dari radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray transmit* serbasama akan tetapi lebih rendah dari radar *phased* array.

## 4.5 Sintesis

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja *beamforming* radar *Phased* -MIMO dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi dilihat dari lebar *mainbeam*, level *sidelobe* pada *transmit*, *diversity* dan *overall beam pattern* serta nilai SINR.

Radar *phased* MIMO dirancang dengan mengatur *antena transmit* menjadi beberapa *subarray* yang saling *overlapping*. Setiap *subarray* terdiri dari elemen-elemen antena yang tersusun secara *uniform* dan linier. *Subarray* ini dapat mengirimkan sinyal yang koheren sehingga kelebihan dari *phased array* radar bisa didapatkan. *Subarray-subarray* dirancang untuk dapat mengirimkan sinyal-sinyal yang saling *orthogonal* sehingga dapat terbentuk *waveform diversity* di mana *waveform diversity* merupakan keunggulan dari sistem radar MIMO.



Sistem radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi dibentuk dengan mengatur jumlah elemen *subarray transmit*. Jumlah elemen *subarray transmit* baru diatur lebih besar satu dari jumlah elemen *subarray* sebelumnya.

Pengujian sistem radar dilakukan pada *transmit*, *diversity* dan *overall beampattern*. Pada pengujian *overall beampattern* dilakukan dua pembobotan yaitu konvensional dan MVDR. Nilai SINR juga dianalisis. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh bahwa radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray* bervariasi memiliki kinerja yang baik pada *overall beampattern* dilihat dari level *sidelobe*. Nilai SINR selalu lebih tinggi dibandingkan radar *phased* MIMO dengan ukuran *Subarray transmit* serbasama.

# LAMPIRAN A

## PROPOSAL TUGAS AKHIR

Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Industri – ITS

TE141599 TUGAS AKHIR – 4 SKS

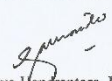
Nama Mahasiswa : Kafabi  
Nomor Pokok : 2212 100 130  
Bidang Studi : Telekomunikasi Multimedia  
Tugas Diberikan : Semester Genap Th. 2015/2016  
Dosen Pembimbing : 1. Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng, Ph.D.  
Judul Tugas Akhir : *Beamforming Radar Phased MIMO dengan Ukuran Subarray Transmit Bervariasi.*  
(*Beamforming Phased MIMO Radar With Unequal Transmit Subarray*)

11 FEB 2016

### Uraian Tugas Akhir :

Radar *phased* array telah banyak digunakan untuk mengarahkan *beam* pada arah yang diinginkan berdasarkan pergeseran fase pada elemen antenna. *Gain* pada sisi *transmit* sangat menguntungkan dalam mendeteksi target di ruang bebas. Tipe radar lain yang sangat berbeda adalah radar MIMO dengan antenna *collocated* yang telah menyita perhatian para peneliti selama satu dekade terakhir. Radar MIMO dengan antenna *collocated* menyediakan resolusi sudut dan pengidentifikasian parameter yang lebih baik. Gabungan dari radar MIMO dan *phased* array telah dikembangkan pada tahun terakhir untuk mengombinasikan keuntungan dari radar MIMO dan *phased* array. Ide yang ditawarkan adalah pengaturan input antenna array menjadi beberapa ukuran *subarray* yang boleh saling tumpang tindih atau tidak sama sekali. Pada radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray transmit* yang tidak saling tumpang tindih menunjukkan bahwa lebar beam dapat dikontrol melalui pengaturan sinyal MIMO. Sedangkan pada radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray* yang saling tumpang tindih terlihat perbedaan pada fungsi ambiguitas dan pola beam *transmit/receive*. Dengan membagi array antenna menjadi *subarray* dengan ukuran yang berbeda dan saling tumpang tindih, pada radar *phased* MIMO dihasilkan *subarray* dengan jumlah elemen dari *subarray* baru masing-masing selalu lebih besar dari *subarray* sebelumnya dan setiap *subarray* memancarkan bentuk gelombang yang unik. Dengan menggunakan cara ini, dapat diperoleh ukuran *subarray transmit* yang berbeda-beda sehingga dapat memfokuskan beberapa *beam* yang mempunyai *gain* bervariasi pada target yang diinginkan.

Dosen Pembimbing,

  
Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng, Ph.D  
NIP : 19701111993031002

Mengetahui,  
Jurusan Teknik Elektro FTI – ITS  
Ketua  
  
Dr. Eng. Achyono Priyadi, S.T., M.Eng.  
NIP : 197309271998031004

Menyetujui,  
Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia  
Koordinator,  


Dr. Ir. Endroyono, DEA  
NIP : 196504041991021001

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## LAMPIRAN B

### PROGRAM MATLAB

Radar MIMO, *Phased array* dan *Phased MIMO* dengan *subarray transmit* serbasama

```
clear;clc;
M = 10;
% Total number of transmitting antennas
M_r = 10;
% Total number of receiving antennas
d_t = 0.5;
% transmitter spacings in wavelength
theta_tar = 0*pi/180;
% Direction of target is 10 degrees to the
broadside of the array
a_tar = exp(-j*d_t*2*pi*(0:M-1))*sin(theta_tar)); % Uplink steering vector
b_tar = exp(-j*pi*(0:M_r-1))*sin(theta_tar));
% Downlink steering vector; Tx and Rx are
assumed to be close to each other
theta_intrf = [-40 -10]*pi/180;
% Interference directions
a_intrf = exp(-j*d_t*2*pi * (0:M-1))*sin(theta_intrf)); % steering vectors of
interference
b_intrf = exp(-j*pi * (0:M_r-1))*sin(theta_intrf));
%
no_subarrays = [1 5 10]; % K = 1, 5, and 10
correspond to Phased -array, Phased -MIMO, and
MIMO radars, respectively
P_noise = 1;
INR = 50;
P_intrf = 10^(INR/10);
SNR = -30:10:30;
L_snr = length(SNR);
sinr_o = zeros(L_snr,length(no_subarrays));
Tx_pattern_conv = [];
% Transmit beampattern
Dx_pattern_conv = [];
```

```

% Diversity beampattern
Rx_pattern_conv = [];
% Overall beampattern
for ksub = 1:length(no_subarrays);
    K_sub = no_subarrays(ksub);
    M_sub = M - K_sub + 1 ;
% Number of antennas in each subarray
    w_u = a_tar(1:M_sub); %
Uplink weight vector
    w_u = w_u/(norm(w_u));
    W_u = kron(ones(1, K_sub), w_u);
% Computing Transmit and diversity
beampatterns
    Theta_grid = [linspace(-pi/2,pi/2,1801)];
    Tx_grid = exp(-j*d_t*2*pi * (0:M-
1)*sin(Theta_grid));
    kk = 1; % kk refers to the k-th subarray,
i.e., kk=1,...,K. Note that the K subarrays are
identical. So the transmit beampattern is
identical for all of them.
    Tx_pattern =
abs(W_u(:,kk)'*Tx_grid(kk:M_sub + kk-1,:)).^2;
    Tx_pattern = 10*log10(Tx_pattern);Tx_pattern
= Tx_pattern - max(Tx_pattern);
    Tx_pattern_conv = [Tx_pattern_conv;
Tx_pattern];
    Dx_pattern =
abs(a_tar(1:K_sub)'*Tx_grid(1:K_sub,:)).^2;
    Dx_pattern = 10*log10(Dx_pattern);Dx_pattern
= Dx_pattern - max(Dx_pattern);
    Dx_pattern_conv = [Dx_pattern_conv;
Dx_pattern];
% Compute virtual steering vectors of
target/interference

    Tx_sv = exp(-j*d_t*2*pi * (0:M-
1)*sin(theta_tar));
    Rx_sv = exp(-j*pi * (0:M_r-
1)*sin(theta_tar)); % Actual receiving steering

```

```

vectors
    v_sv = [];
    for kk = 1:K_sub
        v_temp = [];
        w_u = W_u(:,kk);
        for jj = 1:length(theta_tar)
            %abs(w_u'*a_intrf(i:M_sub + i-1,
jj))
                v_temp = [v_temp,
(w_u'*Tx_sv(kk:M_sub + kk-1, jj))*Rx_sv(:,jj)];
            end
            v_sv = [v_sv; v_temp];
        end

        Tx_sv1 = exp(-j*d_t*2*pi * (0:M-
1))*sin(theta_intrf));
        Rx_sv1 = exp(-j*pi * (0:M_r-
1))*sin(theta_intrf)); % Actual receiving
steering vectors
        v_sv1 = [];
        for kk = 1:K_sub
            v_temp1 = [];
            w_u = W_u(:,kk);
            for jj = 1:length(theta_intrf)
                %abs(w_u'*a_intrf(i:M_sub + i-1,
jj))
                    v_temp1 = [v_temp1,
(w_u'*Tx_sv1(kk:M_sub + kk-1,
jj))*Rx_sv1(:,jj)];
                end
                v_sv1 = [v_sv1; v_temp1];
            end

            for snr = 1:L_snr, snr
                P_tar = 10^(SNR(snr)/10);
                %P_intrf = P_tar; % keeping target and
interference at the same power level
                % Compute signal model using
conventional uplink beamforming

```

```

Mt = length(a_tar);
Mr = length(b_tar);
M_sub = M - K_sub + 1;
L_intrf = length(a_intrf(1,:));
% ----- Orthogonal waveforms -----
N = 400; % number of samples within one
radar pulse (fast-time)
phi = [];
for kk = 1:K_sub
    phi = [phi; exp(j*2*pi*(kk/N)*(0:N-
1))];
end
% compute signals reflect by targets
(observed by receiver)
T = 200; % number of radar pulses (slow-
time)
y = zeros(K_sub*Mr,T); % K_sub matched
filter applied to each antenna output (y is of
size K_sub*N \times T)
Beta_tar = sqrt(P_tar)*
(randn(1,T)+1i*randn(1,T));
Beta_intrf = sqrt(P_intrf)*
(randn(L_intrf,T)+1i*randn(L_intrf,T));
for tt = 1:T; % tt is the snapshot
number
    % compute signals observed at
    targets
    x_tar = zeros(1,N);
    x_intrf = zeros(L_intrf,N);
    for kk = 1:K_sub
        x_tar = x_tar +
Beta_tar(tt)*(W_u(:,kk)'* a_tar(kk:M_sub + kk-
1))* phi(kk,:);
        for ii = 1:L_intrf
            x_intrf(ii,:) =
x_intrf(ii,:) + Beta_intrf(ii,tt)*(W_u(:,kk)'*
a_intrf(kk:M_sub + kk-1,ii))*phi(kk,:);
        end
    end
    Z =

```

```

(randn(Mr,N)+1i*randn(Mr,N));
        x1 = b_tar * x_tar;
        x2 = b_intrf * x_intrf;
        x = x2 + Z;
        y((kk-1)*Mr+1:kk*Mr,tt) =
(1/N)*x*conj(phi(kk,:).');
        end
    end
    R = (1/T)*(y*y');

        w_d_conv = v_sv/(norm(v_sv)); %
conventional downlink beamformer
        % output SINR for conventional Tx/Rx
Phased -MIMO radar
        SINR_conv(snr,ksub) =
10*log10((M/K_sub)*P_tar*(abs(w_d_conv'*(v_sv)))
^2/real(w_d_conv'*((M/K_sub)*P_intrf*v_sv1*v_sv1
'+ P_noise*eye(K_sub*M_r))*w_d_conv));
        % MVDR beamformer
        R_y = inv(R);
        w_d_capon = (1/(v_sv' * R_y * v_sv)) *
R_y * v_sv;
        % Compute and plot overall Tx/Rx
beampattern
        w_d = w_d_conv; % konvensional
        % w_d = w_d_capon; % MVDR
        Tx_sv2 = exp(-j*d_t*2*pi * (0:M-
1))*sin(Theta_grid));
        Rx_sv2 = exp(-j*pi * (0:M_r-
1))*sin(Theta_grid)); % Actual receiving
steering vectors
        v_sv2 = [];
        for kk = 1:K_sub
            v_temp2 = [];
            w_u = W_u(:,kk);
            for jj = 1:length(Theta_grid)
                %abs(w_u'*a_intrf(i:M_sub + i-1,
jj))
            v temp2 = [v temp2,

```



```

(w_u'*Tx_sv2(kk:M_sub + kk-1,
jj))*Rx_sv2(:,jj)];
    end
    v_sv2 = [v_sv2; v_temp2];
    end
    Rx_pattern =
[10*log10(abs(w_d'*v_sv2).^2)];
    Rx_pattern = Rx_pattern -
max(Rx_pattern);
    Rx_pattern_conv = [Rx_pattern_conv;
Rx_pattern];
    %
    SINR_MVDR(snr,ksub) =
10*log10((M/K_sub)*P_tar*(abs(w_d_capon'*(v_sv))
)^2/real(w_d_capon'*((M/K_sub)*P_intrf*v_sv1*v_s
v1'+ P_noise*eye(K_sub*M_r))*w_d_capon));
    end
end

```

#### **Radar *Phased* MIMO dengan *subarray* transmit bervariasi**

```

m=[1 1 1 1 1;1 1 1 1 1;1 1 1 1 1;1 1 1 1 1;1 1 1
1 1;1 1 1 1 1;0 1 1 1 1;0 0 1 1 1;0 0 0 1 1;0 0
0 0 1]
M = 10;
% Total number of transmitting antennas
M_r = 10;
% Total number of receiving antennas
d_t = 0.5;
% transmitter spacings in wavelength
theta_tar = 0*pi/180;
% Direction of target is 10 degrees to the
broadside of the array
a_tar = exp(-j*d_t*2*pi*(0:M-
1))*sin(theta_tar)); % Uplink steering vector
b_tar = exp(-j*pi*(0:M_r-1))*sin(theta_tar));
% Downlink steering vector; Tx and Rx are
assumed to be close to each other

```

```

theta_intrf = [-40 -10]*pi/180;
% Interference dirstions
a_intrf = exp(-j*d_t*2*pi * (0:M-
1)')*sin(theta_intrf));% steering vectors of
interference
b_intrf = exp(-j*pi * (0:M_r-
1)')*sin(theta_intrf));
w_uu=[]
for i=1:5
    w_u = a_tar.*m(:,i);
    Uplink weight vector
    w_u = w_u/(norm(w_u));
    w_uu=[w_uu, w_u];
end
w_uu
%
no_subarrays = [5];
P_noise = 1;
INR = 50;
P_intrf = 10^(INR/10);
SNR = -30:10:30;
L_snr = length(SNR);
sinr_o = zeros(L_snr,length(no_subarrays));
Tx_pattern_conv1 = [];
% Transmit beampattern
Dx_pattern_conv1 = [];
% Diversity beampattern
Rx_pattern_conv1 = [];
% Overall beampattern
for ksub = 1:length(no_subarrays);
    K_sub = no_subarrays(ksub);
    % Computing Transmit and diversity
    beampatterns
    Theta_grid = [linspace(-pi/2,pi/2,1801)];
    Tx_grid = exp(-j*d_t*2*pi * (0:M-
1)')*sin(Theta_grid));
    kk = 5; % kk refers to the k-th subarray,
    i.e., kk=1,...,K. Note that the K subarrays are
    identical. So the transmit beampattern is

```

```

identical for all of them.
    Tx_pattern = abs(w_uu(:,kk)'*Tx_grid).^2;
    Tx_pattern = 10*log10(Tx_pattern);Tx_pattern
= Tx_pattern - max(Tx_pattern);
    Tx_pattern_conv1 = [Tx_pattern_conv1;
Tx_pattern];
    Dx_pattern =
abs(a_tar(1:K_sub)'*Tx_grid(1:K_sub,:)).^2;
    Dx_pattern = 10*log10(Dx_pattern);Dx_pattern
= Dx_pattern - max(Dx_pattern);
    Dx_pattern_conv1 = [Dx_pattern_conv1;
Dx_pattern];
    % Compute virtual steering vectors of
target/interference

    Tx_sv = exp(-j*d_t*2*pi * (0:M-
1)')*sin(theta_tar));
    Rx_sv = exp(-j*pi * (0:M_r-
1)')*sin(theta_tar)); % Actual receiving steering
vectors
    v_sv5 = [];
    for kk = 1:K_sub
        v_temp = [];
        wu = w_uu(:,kk);
        for jj = 1:length(theta_tar)
            %abs(w_u'*a_intrf(i:M_sub + i-1,
jj))
                v_temp = [v_temp,
(wu'*Tx_sv(:,jj))*Rx_sv(:,jj)];
            end
        v_sv5 = [v_sv5; v_temp];
    end

    Tx_sv1 = exp(-j*d_t*2*pi * (0:M-
1)')*sin(theta_intrf));
    Rx_sv1 = exp(-j*pi * (0:M_r-
1)')*sin(theta_intrf)); % Actual receiving
steering vectors
    v_sv1 = [];

```

```

    for kk = 1:K_sub
        v_temp1 = [];
        wu1 = w_uu(:,kk);
        for jj = 1:length(theta_intrf)
            %abs(w_u'*a_intrf(i:M_sub + i-1,
jj))
                v_temp1 = [v_temp1, (wu1'*Tx_sv1(:,
jj))*Rx_sv1(:,jj)];
            end
            v_sv1 = [v_sv1; v_temp1];
        end

        for snr = 1:L_snr, snr
            P_tar = 10^(SNR(snr)/10);
            %P_intrf = P_tar; % keeping target and
interference at the same power level
            % Compute signal model using
conventional uplink beamforming
            Mt = length(a_tar);
            Mr = length(b_tar);
            %M_sub = M - K_sub + 1;
            L_intrf = length(a_intrf(1,:));
            % ----- Orthogonal waveforms -----
            N = 400; % number of samples within one
radar pulse (fast-time)
            phi = [];
            for kk = 1:K_sub
                phi = [phi; exp(j*2*pi*(kk/N)*(0:N-
1))];
            end
            % compute signals reflect by targets
(observed by receiver)
            T = 200; % number of radar pulses (slow-
time)
            y = zeros(K_sub*Mr,T); % K_sub matched
filter applied to each antenna output (y is of
size K_sub*N \times T)
            Beta_tar = sqrt(P_tar)*
(randn(1,T)+1i*randn(1,T));

```

```

        Beta_intrf = sqrt(P_intrf)*
(randn(L_intrf,T)+1i*randn(L_intrf,T));
        for tt = 1:T;    % tt is the snapshot
number
            % compute signals observed at
targets
                x_tar = zeros(1,N);
                x_intrf = zeros(L_intrf,N);
                for kk = 1:K_sub
                    x_tar = x_tar +
Beta_tar(tt)*(w_uu(:,kk)'* a_tar)* phi(kk,:);
                    for ii = 1:L_intrf
                        x_intrf(ii,:) =
x_intrf(ii,:) + Beta_intrf(ii,tt)*(w_uu(:,kk)'*
a_intrf(:,ii))*phi(kk,:);
                    end
                    Z =
(randn(Mr,N)+1i*randn(Mr,N));
                    x1 = b_tar * x_tar;
                    x2 = b_intrf * x_intrf;
                    x = x2 + Z;
                    y((kk-1)*Mr+1:kk*Mr,tt) =
(1/N)*x*conj(phi(kk,:).');
                    end
                end
            R = (1/T)*(y*y');

        w_d_conv = v_sv5/(norm(v_sv5));    %
conventional downlink beamformer
        % output SINR for conventional Tx/Rx
Phased -MIMO radar
        SINR_conv1(snr,ksub) =
10*log10((M/K_sub)*P_tar*(abs(w_d_conv'*(v_sv5))
)^2/real(w_d_conv'*((M/K_sub)*P_intrf*v_sv1*v_sv
1'+ P_noise*eye(K_sub*M_r))*w_d_conv));
        % MVDR beamformer
        R_y = inv(R);
        w_d_capon = (1/(v_sv5'* R_y * v_sv5)) *
R_y * v_sv5;

```

```

        % Compute and plot overall Tx/Rx
        beampattern
        w_d = w_d_conv; % untuk konvensional
        % w_d = w_d_capon; % untuk MVDR
        Tx_sv2 = exp(-j*d_t*2*pi * (0:M-
1))*sin(Theta_grid));
        Rx_sv2 = exp(-j*pi * (0:M_r-
1))*sin(Theta_grid)); % Actual receiving
        steering vectors
        v_sv2 = [];
        for kk = 1:K_sub
            v_temp2 = [];
            wu2 = w_uu(:,kk);
            for jj = 1:length(Theta_grid)
                %abs(w_u'*a_intrf(i:M_sub + i-1,
jj))
                v_temp2 = [v_temp2,
(wu2'*Tx_sv2(:, jj))*Rx_sv2(:,jj)];
            end
            v_sv2 = [v_sv2; v_temp2];
        end
        Rx_pattern =
[10*log10(abs(w_d'*v_sv2).^2)];
        Rx_pattern = Rx_pattern -
max(Rx_pattern);
        Rx_pattern_conv1 = [Rx_pattern_conv1;
Rx_pattern];
        %
        SINR_MVDR1(snr, ksub) =
10*log10((M/K_sub)*P_tar*(abs(w_d_capon'*(v_sv5)
))^2/real(w_d_capon'*((M/K_sub)*P_intrf*v_sv1*v_
sv1'+ P_noise*eye(K_sub*M_r))*w_d_capon));
        end
    end
end

```

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Setelah melakukan simulasi *beamforming* pada radar *phased* MIMO dengan ukuran *subarray transmit* bervariasi, sesuai dengan asumsi-asumsi yang telah dilakukan sebelumnya, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. HPBW dari sistem radar pada sisi *transmit* paling tinggi dimiliki oleh sistem radar *phased array*, pada sisi *diversity* adalah radar MIMO dan pada *overall beampattern* pada radar *Phased MIMO*
2. Level *sidelobe* paling rendah pada sisi *transmit* dimiliki oleh radar *phased MIMO*, pada sisi *diversity* dimiliki oleh radar MIMO dan pada sisi *overall beampattern* dimiliki oleh radar *phased MIMO*
3. Berdasarkan hasil pengujian, nilai SINR *phased MIMO* radar memiliki nilai sedikit dibawah radar *phased array* dan jauh lebih tinggi dibandingkan dengan radar MIMO dan *subarray transmit* bervariasi selalu lebih tinggi dari *subarray transmit* serbasama.

#### **5.2 Saran**

Dalam melakukan pengembangan sistem radar *phased MIMO* kedepannya, dapat diperhatikan beberapa hal sebagai berikut:

1. Menggunakan variasi *subarray transmit* bervariasi yang lain agar dapat diketahui variasi *subarray transmit* bervariasi yang memiliki kinerja lebih baik
2. Untuk tahap selanjutnya tugas akhir ini mungkin bisa diajarkan sebagai referensi dan diimplementasikan.



*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2001.
- [2] J. Li and P. Stoica, "MIMO Radar Signal Processing", 2009. Jhon Willey and Sons, Inc
- [3] R. J. Mailloux, *Phased Array Antena Handbook*, 2nd ed. Boston, MA, USA: Artech House, 2005.
- [4] E. Fishler *et al.*, "MIMO radar: An idea whose time has come," in *Proc. IEEE Radar Conf.*, Philadelphia, PA, USA, Apr. 2004, vol. 2, pp. 71–78.
- [5] J. Li and P. Stoica, "MIMO radar with colocated antennas," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 24, no. 5, pp. 106–114, Sep. 2007.
- [6] D. R. Fuhrman, J. P. Browning, and M. Rangaswamy, "Signaling strategies for the hybrid MIMO *phased* -array radar," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 4, no. 1, pp. 66–78, Feb. 2010.
- [7] A. Hassanien and S. A. Vorobyov, "*Phased* -mimo radar: A tradeoff between *phased* -array and MIMO radars," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 58, no. 6, pp. 3137–3151, Jun. 2010.
- [8] W. Kan, I. M. Qureshi, A. Basit, and M. Zubair, "Hybrid *Phased* MIMO Radar With Unequal *Subarrays*" *IEEE Antenas and wireless propagation letters*, vol. 14, 2015
- [9] Scheer, James A.,dkk.: Principles of Modern Radar : Basic Principles. 2010. Scitech Publishing
- [10] Melvin, William L., Scheer, James A.: Principles of Modern Radar : Advanced Techniques. 2013. Scitech Publishing
- [11] Balanis, Constantine A. : *Antenna Theory, Analisis and Design: Third Edition*. Wiley-Interscience.
- [12] Stutzman, Warren L., Thiele, Gary A. : *Antenna Theory and Design Third Edition*. Wiley-Interscience.
- [13] Goldsmith, A.: *Wireless Communications*. 2004. Stanford University.

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## RIWAYAT PENULIS



**Kafabi**, anak keempat dari tujuh bersaudara dari pasangan Abdul Charis dan Umi Syarifah. Lahir di Gresik pada tanggal 26 Desember 1993. Memulai pendidikan formal di MI Miftahul Huda Sumberrejo, lulus pada tahun 2006. Melanjutkan di SMP Negeri 1 Bungah, lulus pada tahun 2009. Kemudian melanjutkan ke SMA Negeri 1 Gresik dan lulus pada tahun 2012. Setelah lulus SMA, penulis melanjutkan ke jenjang sarjana (S1) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, jurusan Teknik Elektro, dengan mengambil bidang konsentrasi Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia. Selama kuliah, penulis juga aktif diberbagai organisasi kampus, khususnya di UKM Cinta Rebana ITS dan BSO Kalam Elektro ITS.

e-mail: [id.kafabi@gmail.com](mailto:id.kafabi@gmail.com)

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*